การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสานของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ที่ผลิตในประเทศไทย

An Integrated Environmental Assessment of Life Cycle of Printing and Writing Paper Produced in Thailand

ธนิดา แซ่ตัน

Tanida Saetun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Science in Environmental Management

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสานของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตในประเทศไทย

ผู้เขียน นางสาวธนิดา แซ่ตัน

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

....

(ดร.ธันวดี เตชะภัททวรกุล สุขสาโรจน์)

....

(ดร.วาริท เจาะจิตต์)

คณะกรรมการสอบ

....ประธานกรรมการ

(ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร กมลศิริพิชัยพร)

....กรรมการ

(ดร.ศุภชัย ภิสัชเพ็ญ)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์)

....กรรมการ

(ดร.วาริท เจาะจิตต์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสานของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตในประเทศไทย
ผู้เขียน นางสาวธนิดา แซ่ตัน
สาขา การจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสานมาใช้เป็นหลักการร่วมกันของการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) และการวิเคราะห์หลายเกณฑ์ (MCA) ซึ่งมีจุดเด่น คือ สามารถนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมหลายตัวมาประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนได้ โดยกำหนดขอบเขตการศึกษาออกเป็น 4 ระบบย่อย คือ ระบบการปลูกยูคาลิปตัส ระบบการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ระบบการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน และระบบการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน โดยระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวมมากที่สุดเท่ากับ 1.10E-04 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม 5 ประเภท คือ สภาวะโลกร้อน สภาวะฝนกรด สภาวะการแพร่กระจายของพืชน้ำ สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ จากการประเมิน พบว่า กิจกรรมสำคัญที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบรวมกันมากกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 80 มี 9 กิจกรรมจาก 21 กิจกรรมในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ การเผาไหม้ชีวมวล การบำบัดน้ำเสีย การเผาไหม้น้ำมันเตา การเทกองกลางแจ้ง การฝังกลบ การต้มเยื่อ การฟอกเยื่อ การรีดน้ำออก และการเผาไหม้ของเหลวดำ ซึ่งทางเลือกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่สามารถลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมดได้ คือ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนซึ่งไม่มีการเผาไหม้ เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน นอกจากนี้จากการศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลอง พบว่า การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลโดยสมมูลพลังงาน สามารถลดผลกระทบสภาวะโลกร้อนได้ เช่นเดียวกับการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษใช้แล้วส่งผลต่อการลดลงของสภาวะโลกร้อน สภาวะยูโทรฟิเคชั่น และสภาวะหมอกควันพิษ ซึ่งนำไปสู่การผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การนำแบบจำลองมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในการศึกษานี้นอกจากพบสาเหตุของปัญหาที่ควรแก้ไขแล้ว ผลที่ได้ช่วยในการตัดสินใจเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดีของการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนในอนาคตต่อไป

Thesis Title An Integrated Environmental Assessment of Life Cycle of Printing and Writing Paper Produced in Thailand

Author Tanida Saetun

Major Program Environment Management

Academic Year 2009

ABSTRACT

This study aims to assess the environmental impact from writing and printing paper process using Life Cycle Assessment (LCA) with Multi-Criteria Analysis (MCA) model. One of the strengths of this model is the many criteria could be used commonly to assess the environment impact. The scope of the study included 4 systems, eucalyptus forestry, eucalyptus-based karft pulp production, writing and printing paper production and disposal. The eucalyptus-based karft pulp production initiated highest overall environmental impact by 1.10E-04. The environmental impact considered consisted global warming, acidification, eutrophication, smog and human toxicity. The result of the assessment show that 9 activities from a total of 21 activities in order from high to low impact contributed to the total impact $\geq$ 80%. These activities priority of biomass combustion, wastewater treatment, bunker oil combustion, open dump, landfill, pulp cooking, pulp bleaching, de-watering, and black liquor combustion. The most effective alternative to decrease the environmental impact was the use of alternative energy without combustion to produce the electricity for use in writing and printing paper process. In addition, the sensitivity analysis using our model showed that the replacement of fuel oil in energy equivalent could reduce the global warming impact. This was same as the use of paper waste recycling in place of eucalyptus-based kraft pulp which could reduce the impact of global warming, euthophication and smog. These changes would conduct the environmental friendly product. Use of the model to assess the environmental impact in this study not only identify the cause of problems but also help the decision making in the writing and printing paper process management in the future.

สารบัญ

		หน้า
สารบัญ		(6)
รายการตาราง		(10)
รายการตารางภาคผนวก		(13)
รายการภาพประกอบ		(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ		(17)
บทที่		
1	บทนำ	1
	1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
	1.2 การตรวจเอกสาร	3
	1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย	42
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	42
	1.5 ขอบเขตงานวิจัย	44
2	วิธีการวิจัย	45
	2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	45
	2.1.1 กำหนดเป้าหมาย และขอบเขตการศึกษา (Goal and Scope Definition)	45
	2.1.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล	49
	2.1.3 การวิเคราะห์บัญชีรายการข้อมูล (Life Cycle Inventory Analysis) คำนวณ Emission Score และ Impact Score	49
	2.1.4 การศึกษาทางเลือกการลดมลพิษ (Pollution Reduction Option)	63
	2.1.5 กรณีศึกษา	64
	2.1.6 สรุป และวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย	67
3	ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	68
	3.1 การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory Analysis)	68
	3.1.1 สภาวะโลกร้อน (Global Warming)	68
	3.1.2 สภาวะฝนกรด (Acidification)	73
	3.1.3 สภาวะยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication)	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.4 สภาวะหมอกควันพิษ (Smog)	80
3.1.5 ความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Toxicity)	84
3.2 ผลการประเมินระดับกิจกรรม (Result of Activity Level Assessment)	90
3.3 กรณีอ้างอิง (Reference Case)	93
3.3.1 ระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft Pulp Product Sub-System)	95
3.3.2 ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Printing and Writing Paper Production Sub-System)	98
3.3.3 ระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน (Paper Disposal Sub-System)	99
3.4 ทางเลือกเพื่อลดมลพิษ (Options for Emission Reduction)	99
3.4.1 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการต้มเยื่อ (Pulp Cooking)	99
3.4.2 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Combustion)	100
3.4.3 ทางเลือกในการลดมลพิษจากหม้อต้มนำสารเคมีกลับคืน (Recovery Boiler)	103
3.4.4 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการเผาไหม้น้ำมันเตา (Bunker Oil Use in Lime Kiln)	104
3.4.5 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการรีดน้ำออก (De-Watering)	105
3.4.6 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการฟอกเยื่อ (Bleaching Pulp) และบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment)	106
3.4.7 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการฝังกลบ (Landfill)	107
3.4.8 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการเทกองกลางแจ้ง (Open Dump)	107
3.5 ผลการประเมินหลังจากนำทางเลือกมาใช้ (Result of Emission Reduction)	112
3.5.1 สภาวะโลกร้อน (Global Warming)	112
3.5.2 สภาวะฝนกรด (Acidification)	113

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.3 สภาวะการแพร่กระจายของพืชน้ำ (Eutrophication)	115
3.5.4 สภาวะหมอกควันพิษ (Smog)	116
3.5.5 สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Toxicity)	118
3.6 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall Environmental Impact)	119
3.7 กรณีศึกษา (Case Study)	123
3.7.1 กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ (Option Reduction)	123
3.7.2 ผลการประเมินกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ (Option Reduction)	127
3.7.3 กรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ (Geographical Scale)	132
3.7.4 ผลการประเมินกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ (Geographical Scale)	133
3.7.5 กรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Sensitivity Analysis)	139
3.7.6 ผลการประเมินกรณีศึกษาความอ่อนไหวผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Sensitivity Analysis)	142
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	154
4.1 บทสรุป	154
4.2 ข้อเสนอแนะ	155
4.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับโรงงาน	155
4.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยเพิ่มเติม	155
บรรณานุกรม	156
ภาคผนวก	170
ก การคำนวณข้อมูลขาเข้า และขาออก	171
ข ประสิทธิภาพของทางเลือก (Efficiency Single Option)	175

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ค	แบบสอบถาม	178
ง	วิธีการคำนวณตัวคูณการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting Factor) กับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแบบ The Analytical Hierarchy Process: AHP	183
จ	การคำนวณปริมาณการดูดซับก๊าซ CO_2จากต้นยูคาลิปตัส	186
ฉ	การคำนวณปริมาณการปลดปล่อยมลสารจากการใช้ปุ๋ย	188
ประวัติผู้เขียน		190

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1-1	ตัวอย่างค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) จากการใช้ปุ๋ยในการปลูกยูคาลิปตัส	9
1-2	ตัวอย่างตัวคูณผลกระทบสิ่งแวดล้อม หรือค่าความสามารถจำเพาะ (Characterization Factor) ในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน	11
1-3	โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการศึกษา LCA ที่มีอยู่ในท้องตลาด	17
1-4	ความหมายของตัวแปรต่างๆ ในสมการที่นำมาใช้ในการประเมิน	22
1-5	ข้อดี และข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่พัฒนามาจาก Jawjit *et al.* (2007) เพื่อใช้ในการประเมิน วัฏจักรชีวิตเยื่อยูคาลิปตัสที่ผลิตด้วยกระบวนการคราฟท์	24
2-1	ปริมาณระดับกิจกรรมทางสิ่งแวดล้อมที่นำมาใช้ในการประเมิน ผลกระทบของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่กำลังการผลิต 1,000,000 ตัน/ปี	50
2-2	กิจกรรมต่างๆ ภายในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน	51
2-3	ค่าตัวคูณผลกระทบ (Emission Factor: EF) แต่ละตัว ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน	53
2-4	ค่าความสามารถจำเพาะในการก่อให้เกิดผลกระทบ (Characterization Factor: CF) แต่ละประเภท	59
2-5	ค่าตัวคูณค่าปกติ (Normalization Factor: NF) ของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท	61
2-6	ตัวอย่างการคำนวณค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา	62
2-7	ตัวอย่างการคำนวณค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Effect Score) จากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา	62
2-8	ตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) ของแต่ละผลกระทบ สิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์	66

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
3-1	ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) จากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน (ไม่รวมมลสาร CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้ของเหลวดำ การฝังกลบ และการเผากระดาษเสีย)	71
3-2	มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด	74
3-3	มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น	77
3-4	มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ	81
3-5	มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะ ความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์	86
3-6	ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในแต่ละประเภทของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน	88
3-7	สัดส่วนของมลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบแต่ละประเภท	90
3-8	ความแตกต่างของกรณีอ้างอิง และกรณีปัจจุบัน	94
3-9	ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในกรณีอ้างอิง เพื่อลดการปลดปล่อยมลสารในแต่ละกิจกรรมที่ส่งผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆ	109
3-10	ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกของกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ และกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์	126
3-11	ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Impact Score) ที่เกิดขึ้นของกรณีศึกษา ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลด มลสารต่างๆจาก 9 กิจกรรมสำคัญ	130
3-12	ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Impact Score) ที่เกิดขึ้นในกรณีปัจจุบัน และกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทาง ภูมิศาสตร์จาก 9 กิจกรรมสำคัญ	136

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง **หน้า**

3-13 ตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) กรณีปัจจุบัน 139
และกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ของแต่ละผลกระทบ
3-14 ค่าตัวคูณมลพิษ (Emission Factor) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล และน้ำมันเตา 140
3-15 มลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระดาษด้วยกระดาษเสีย 141
(Waste Paper Recycling)
3-16 กระทบทางสิ่งแวดล้อม (Impact Score) ที่เกิดขึ้นในกรณีปัจจุบัน 144
และกรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมจาก 9 กิจกรรม

รายการตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวก **หน้า**

ข-1	ปริมาณมลสารแต่ละประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกระบบ BIGCC มาใช้	176
ง-1	ขั้นตอนแรกของการคำนวณ Weighting Factor ด้วยวิธี AHP	183
ง-2	ขั้นตอนที่สองของการคำนวณ Weight Factor ด้วยวิธี AHP	184
ง-3	ขั้นตอนที่สามของการคำนวณ Weight Factor ด้วยวิธี AHP	184
ง-4	Weighting Factor ของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระดับภูมิภาค (Regional)	185
ง-5	Weighting Factor ของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระดับท้องถิ่น (Local)	185
จ-1	ข้อมูลขาเข้าเพื่อการประเมินปริมาณ C จากการดูดซับด้วยยูคาลิปตัส	186
จ-2	ปริมาณ C ที่ถูกดูดซับจากต้นยูคาลิปตัส	187
จ-3	ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซับจากต้นยูคาลิปตัส	187
ฉ-1	ค่าการปลดปล่อยมลสารจากการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 5	188
ฉ-2	ค่าการปลดปล่อยมลสารจากการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัส ด้วยกระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 10 และ 20	189

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1-1	วัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์	4
1-2	กรอบการดำเนินงาน LCA ตามอนุกรมาตรฐาน ISO 14040	5
1-3	การจำแนกมลสารต่างๆ เข้ากลุ่มตามประเภทของผลกระทบสิ่งแวดล้อม	10
1-4	กระดาษพิมพ์เขียน	29
1-5	เยื่อยูคาลิปตัสฟอกขาว	30
1-6	กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft Pulp Process)	32
1-7	กระดาษม้วนใหญ่ (Jumbo Roll)	33
1-8	กระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Printing and Writing Paper Process)	34
1-9	ระบบย่อยยูคาลิปตัส (Eucalyptus forestry sub-system)	37
1-10	ระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft pulp production sub-system)	38
1-11	ตัวอย่าง Simple Flow Sheet ซึ่งสามารถนำมาใช้กับการคัดเลือกข้อมูลได้	41
1-12	ขั้นตอน และขอบเขตของ LCA	41
1-13	วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน	43
1-14	ขอบเขตระบบการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของ วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนในการศึกษาครั้งนี้	44
2-1	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	46
2-2	ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Printing Paper Sub-System)	47
2-3	ระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน (Paper Disposal Sub-System)	48
3-1	สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน (รวมมลสาร CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล)	70
3-2	สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน (ไม่รวมมลสาร CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล)	70
3-3	สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด	73
3-4	สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะการแพร่กระจายของพืชน้ำ	76
3-5	สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ	80

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

3-6 สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ 85

3-7 ผลกระทบโดยรวม (Overall) ที่เกิดขึ้นจากกรณีอ้างอิงที่ใช้ในการประเมินผลกระทบ 89

3-8 หน่วยการผลิตไฟฟ้า และหน่วยนำกลับคืนสารเคมีของระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ 96

3-9 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนเทียบกับกรณีอ้างอิง 113

3-10 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเทียบกับกรณีอ้างอิง 114

3-11 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นเทียบกับกรณีอ้างอิง 116

3-12 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษเทียบกับกรณีอ้างอิง 117

3-13 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เทียบกับกรณีอ้างอิง 118

3-14 ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (Overall Environmental Impact) ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน 121

3-15 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง (กรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ) 131

3-16 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง (กรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์) 137

3-17 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาแทนที่น้ำมันเตาในสัดส่วนต่างๆ 145

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

3-18 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัส ด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่ที่สัดส่วนต่างๆ 146

3-19 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) ที่เกิดขึ้นจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง (กรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อม) 153

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

AD	=	Acidification คือ สภาวะฝนกรด
ADt	=	Air Dried ton คือ ตันน้ำหนักแห้งของเยื่อกระดาษ
AOX	=	Absorbable Organic Halides คือ สารสลายตัวยาก เกิดจากสารคลอรีนทำปฏิกิริยากับลิกนิน และเป็นสารก่อมะเร็งแก่มนุษย์ สัตว์
BIGCC	=	Biomass Gasification Combined Cycle คือ วิธีการปรับเปลี่ยนคุณภาพของชีวมวล โดยนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของก๊าซที่เผาไหม้ได้ง่าย
BLGCC	=	Black Liquor Gasification Combined Cycle คือ วิธีการปรับเปลี่ยนคุณภาพของของเหลวดำโดยนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูแของก๊าซที่เผาไหม้ได้ง่าย
CaO	=	Calcium oxide คือ ปูนขาว
$CaCO_3$	=	Calcium Carbonate คือ ผลผลิตจากหน่วยทำด่าง ซึ่งใช้ปูนขาวเป็นตัวทำปฏิกิริยาเพื่อนำกลับคืนสารเคมีไปใช้ใหม่ในการต้มเยื่อ
CEA	=	Cost-Effective Analysis คือ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยนำค่าใช้จ่ายต่างๆ มาใช้เพื่อสนับสนุนการประเมินผลกระทบ
CH_4	=	Methane คือ สารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นแก๊ส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไวไฟ ปรากฏในที่ซึ่งมีสารอินทรีย์ผุพังเน่าเปื่อย ในบ่อถ่านหิน ในแก๊สธรรมชาติ
C_2H_4	=	Ethylene คือ เอทธิลีน
CO	=	Carbon Monoxide คือ ก๊าซไม่มีสี ไม่มีรสและกลิ่น เบากว่าอากาศโดยทั่วไปเล็กน้อย
CO_2	=	Carbon Dioxide คือ ชื่อแก๊สชนิดหนึ่ง ไม่มีสี มีปรากฏในบรรยากาศ เกิดจากการเผาไหม้ โดยสมบูรณ์ของธาตุคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ เป็นแก๊สหนักกว่าอากาศ และไม่ช่วยในการเผาไหม้
COD	=	Chemical Organic Demand คือ ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยวิธีการทางเคมี
DCB	=	Dichlorobenzene คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ ใช้ทำลูกเหม็น
ECF	=	Elemental Chlorine Free ระบบการฟอกเยื่อกระดาษที่ใช้สารประกอบคลอรีน เช่น คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) และมีการฟอกหลายขั้นตอน
EP	=	Eutrophication คือ สภาวะการแพร่กระจายของพืชน้ำ

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

ESP	=	Electrostatic Precipitators คือ เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์
FU	=	Functional Unit คือ หน่วยอ้างอิงของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม
GHG	=	Greenhouse Gas คือ ก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน
GW	=	Global Warming คือ สภาวะโลกร้อน
HT	=	Human Toxicity คือ สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์
LCA	=	Life Cycle Assessment คือ การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ หรือบริการต่างๆ
MCA	=	Multi-Criteria Analysis คือ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน โดยสามารถนำตัวแปรต่างๆ มากกว่า 2 ตัวแปรมาใช้ในการประเมินพร้อมกันทั้งหมดในการประเมินครั้งเดียวได้
N	=	Nitrogen คือ ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ หรือออร์กานิกไนโตรเจน
N_2O	=	Nitrous Oxide คือ สารประกอบทางเคมี ไม่มีสี และเป็นแก๊สไม่ติดไฟ มีกลิ่นหอมและมีรสหวานเล็กน้อย
NaOH	=	Sodium Hydroxide คือ สารประกอบอนินทรีย์ที่ได้จากการนำกลับคืนสารเคมีจากของเหลวดำ เพื่อใช้ในการต้มเยื่อ
Na_2CO_3	=	Sodium Carbonate คือ สารประกอบอนินทรีย์ที่เกิดจากการต้มเยื่อซึ่งปนเปื้อนอยู่ในของเหลวดำ และจะต้องนำเข้าสู่กระบวนการทำด่างเพื่อนำกลับคืน NaOH ไปใช้ใหม่ในการต้มเยื่อ
Na_2S	=	Sodium Sulfide คือ สารประกอบอนินทรีย์ใช้ในกระบวนการต้มชิ้นไม้ของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อ และกระดาษเพื่อแยกลิกนินออกจากเนื้อไม้
Na_2SO_4	=	Sodium Sulfate คือ เกลือโซเดียมของกรดกำมะถัน มีผลึกสีขาว ละลายน้ำได้ เกิดขึ้นจากของเหลวดำที่ถูกเผาไหม้กลายเป็นของแข็งหลอมเหลว
NH_3	=	Ammonia คือ สารประกอบเคมี ประกอบด้วยธาตุ ไนโตรเจน และ ไฮโดรเจน ซึ่งละลายในน้ำได้ดีมาก

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

NMVOC	=	Non-Methane Volatile Organic Compounds คือ สารอินทรีย์ระเหยง่ายซึ่งไม่รวมก๊าซมีเทน
NO_3	=	Nitrate คือ ไนเตรท
NO_x	=	Nitrogen Oxide คือ โดยก๊าซในกลุ่มนี้ประกอบด้วย Nitrogen และ Oxygen ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ยกเว้น Nitrogen dioxide ที่รวมกับอนุภาคต่างๆในอากาศ ทำให้สามารถเห็นเป็นชั้นสีน้ำตาลแดง และจะเกิดเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง
OFA	=	Over File Air คือ เทคนิคการลดมลสาร NO_x โดยการเพิ่มอากาศส่วนเกินภายนอกหม้อต้มน้ำของขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล
P	=	Phosphorus คือ ธาตุลำดับที่ 15 เป็นอโลหะ ลักษณะเป็นของแข็ง ละลายน้ำได้ยาก
PO_4^{3-}	=	Phosphate คือ เกลือของฟอสฟอรัส
SCR	=	Selective Catalytic Reduction คือ วิธีการใช้แอมโมเนียทำปฏิกิริยากับ NO_x โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Reduction กลายเป็นไนโตรเจน และไอน้ำซึ่งไม่มีพิษ
SM	=	Smog คือ สภาวะหมอกควันพิษ
SNCR	=	Selective Non-Catalytic Reduction คือ วิธีการใช้แอมโมเนียเป็น Reduction Agent ฉีดพ่นเข้าไปในไอเสียเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับ NO_x ในสถานะก๊าซให้กลายเป็นไนโตรเจนโดยไม่ต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา
SO_2	=	Sulfur Dioxide คือ ก๊าซไม่มีสี ไม่ไวไฟ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ จะเกิดเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และจะรวมตัวเป็นกรดซัลฟูริกเมื่อมีความชื้นเพียงพอ
TCF	=	Totally Chlorine Free ระบบการฟอกเยื่อกระดาษที่ไม่ใช้คลอรีน เช่น ออกซิเจน (O_2) โอโซน (O_3) และมีการฟอกหลายขั้นตอน
TRS	=	Total Reduced Sulfur คือ อนุมูลซัลเฟอร์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุตสาหกรรมกระดาษนับเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญของประเทศไทย นับตั้งแต่เริ่มมีการผลิตเยื่อ และกระดาษในประเทศไทย อุตสาหกรรมดังกล่าวมีการเติบโตต่อเนื่องทุกปีประมาณร้อยละ 5-6 (Sharma, 2004) โดยมีผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท เช่น กระดาษแข็ง กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษอนามัย กระดาษหนังสือพิมพ์ เป็นต้น แม้ความต้องการใช้กระดาษของประเทศไทยในปัจจุบันมีอัตราเฉลี่ยอยู่ที่ 42 กิโลกรัม/คน/ปี ซึ่งยังน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการบริโภคกระดาษในประเทศที่เจริญแล้ว เช่น ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกาที่มีอัตราเฉลี่ยอยู่ที่ 241 และ350 กิโลกรัม/คน/ปี (สำนักวิเคราะห์สินค้าอุตสาหกรรม, 2550) จึงทำให้อุตสาหกรรมกระดาษของไทยมีโอกาสที่จะเติบโตอีกมาก เนื่องจากโอกาสทางด้านการศึกษาในปัจจุบันเปิดกว้างขึ้น ส่งผลให้การใช้กระดาษเพื่อการศึกษามีจำนวนเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะกระดาษพิมพ์เขียน วัตถุดิบสำคัญที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเยื่อในประเทศไทย คือ ยูคาลิปตัส ประมาณร้อยละ 80 ของการผลิตเยื่อทั้งหมดในประเทศไทย เนื่องจากสามารถผลิตกระดาษที่มีคุณภาพดี มีความคงทน และเรียบลื่นเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน (DIW, 1999) เยื่อที่ผลิตภายในประเทศไทย นอกจากจะผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการภายในประเทศที่มีสัดส่วนมากถึงร้อยละ 70 ของการผลิตทั้งหมดแล้ว ส่วนที่เหลือยังสามารถส่งออกไปจำหน่ายในตลาดต่างประเทศ โดยในช่วง 2–3 ปีที่ผ่านมา มีมูลค่าการส่งออกเพิ่มขึ้นทุกปีอย่างต่อเนื่องถึง 4,400 ล้านบาท ในปี 2550 (ฝ่ายวิจัย ธนาคารกรุงศรีอยุธยา, 2551)

อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อจัดเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ โดยอัตราการเติบโตของอุตสาหกรรมเยื่อมีทิศทางเดียวกันกับการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศไทย (ชมรมเพื่อนพิมพ์, 2551) แต่ปัญหาสำคัญของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อ คือ การใช้สารฟอก ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะสารประกอบคลอรีนที่นิยมนำมาใช้ในผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบใช้ซัลเฟต หรือกระบวนการคราฟท์ (Kraft Process) เนื่องจากราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการฟอกสูง ส่งผลต่อการเกิดสาร AOX (Absorbable Organic Halides) ซึ่งสารดังกล่าวเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะถูกออกซิไดซ์ก่อให้เกิดปัญหาแก่สิ่งมีชีวิตในน้ำ และที่สำคัญ คือ เกิดสารก่อมะเร็งที่มีผลต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ขั้นตอนสำคัญในการผลิต

เยื่อด้วยกระบวนการคราฟ คือ การนำกลับคืนสารเคมี ซึ่งโซเดียมซัลไฟล์ (Na_2S) และโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้ในการต้มเยื่อเพื่อทำให้สารลิกนิน (lignin) ในเนื้อไม้หลุดออกก่อนการนำเยื่อที่ได้ไปฟอก ผลที่ตามมา คือ กลิ่น และของเหลวสีดำ (black liquor) ของเหลวดังกล่าวมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์อยู่ปริมาณมาก จึงต้องกำจัดออกก่อนโดยการทำระเหย นำไปต้ม และเข้าสู่กระบวนการทำด่างเพื่อแยก Na_2S และ NaOH ออกจากของเหลวดำ และนำกลับไปใช้ใหม่ในกิจกรรมการต้มเยื่ออีกครั้ง ซึ่งเรียกว่าของเหลวขาว (white liquor) ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) TRS (Total Reduce Sulfur) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นต้น และก่อเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา คือ สภาวะฝนกรด (Acidification) สภาวะหมอกควันพิษ (Smog) และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Toxicity) (Jawjit *et al.,* 2006) นอกจากนี้ปริมาณการใช้น้ำ และพลังงานในกระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบใช้ซัลเฟต 1 ตัน ใช้น้ำประมาณ 50 ลูกบาศก์เมตร ในการล้างเยื่อเพื่อกำจัดลิกนิน และใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 690 กิโลวัตต์/ชั่วโมง (กรมโรงงาน, 2551)

ปัจจุบันมีโรงงานผลิตกระดาษประมาณ 60 โรงงานในประเทศไทย กำลังการผลิตโดยรวมประมาณ 3.7 ล้านตัน/ปี ผลิตกระดาษได้หลายชนิด สำหรับกระดาษพิมพ์เขียนมีผู้ผลิต 13 ราย กำลังการผลิตรวม 1.0 ล้านตัน โดยในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนต้องการเยื่อเป็นวัตถุดิบหลักมากเป็นอันดับสองรองจากกระดาษอนามัย (กระดาษชำระ) (สำนักวิเคราะห์สินค้าอุตสาหกรรม, 2550) ซึ่งอุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์เขียนต้องอาศัยกระบวนการผลิตที่ทันสมัย และมีประสิทธิภาพ แต่ปรากฏว่าในปัจจุบันอุตสาหกรรมดังกล่าวมีผู้ผลิตรายใหญ่เพียงร้อยละ 5 ซึ่งมีเครื่องจักรที่ใช้ในกิจการเป็นเครื่องจักรใหม่ และมีกรรมวิธีการผลิตที่ทันสมัย ในขณะที่ผู้ผลิต ส่วนใหญ่เป็นรายเล็กๆ เนื่องจากมีเงินทุนจำกัดทำให้มีกรรมวิธีการผลิตค่อนข้างล้าสมัย และมีประสิทธิภาพต่ำ จึงก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมาเป็นจำนวนมาก (ชมรมเพื่อนพิมพ์, 2551) ปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแก้ไขได้หากมีการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดีของโรงงาน เพื่อลดการเกิดมลพิษ และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ตรงจุด เครื่องมือชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ และถูกนำมาใช้มากขึ้นในปัจจุบันเพื่อประเมินถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากกิจกรรม ขั้นตอน และหน่วยผลิตต่างๆ ในกระบวนการผลิตเยื่อ และกระดาษ คือ การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

LCA จัดเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่มีจุดเด่น คือ สามารถกำหนดขอบเขตการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ ในขณะที่เครื่องมือชนิดอื่นจำกัดการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้แค่กิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งเท่านั้น (ประเสริฐ และคณะ, 2547) ซึ่งไม่สามารถมองในภาพรวมได้ว่ากิจกรรม ขั้นตอน หรือหน่วยการผลิตใดที่ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุด

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งๆ อีกทั้งผลการประเมินที่ได้มีความชัดเจน เนื่องจากแสดงผลในเชิงปริมาณ ทำให้ทราบถึงที่มาที่ไปได้ชัดเจน และสาเหตุที่แท้จริงของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการได้ นำไปสู่การวางแผนการจัดการ และแนวทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ตรงจุด ถึงแม้ว่า LCA จะเริ่มเป็นที่รู้จัก และนำมาใช้มากขึ้นแต่ก็ยังไม่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่ต้องอาศัยเวลา และทรัพยากรค่อนข้างมากโดยเฉพาะในการจัดทำฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ตลอดทั้งวัฏจักร (ประเสริฐ และคณะ, 2547) ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการทำ LCA เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงภายใต้ข้อจำกัดที่มีอยู่ และเพื่อส่งเสริมความยั่งยืนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Rivela *et al.,* 2004)

จากที่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษา และทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตของกระดาษพิมพ์เขียน โดยใช้ LCA เป็นเครื่องมือในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนภายใต้ขอบเขตที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้น คือ การปลูกต้นยูคาลิปตัส การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน และการจัดการหลังหมดอายุการใช้งานของกระดาษพิมพ์เขียน เพื่อนำผลที่ได้ไปศึกษาทางเลือกต่างๆ และนำมาเป็นแนวทางในการลดการเกิดมลพิษในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนต่อไป

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

มีผู้ให้คำนิยาม การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตามความหมายต่างๆ ดังต่อไปนี้

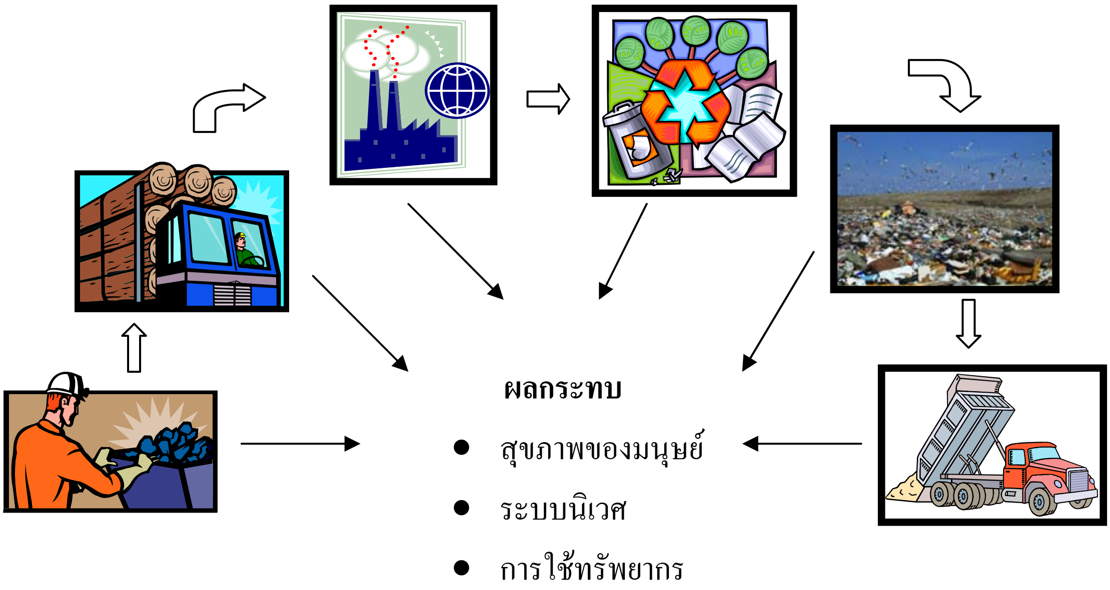
SETAC (Society of Environment Toxicology and Chemistry) ได้ให้นิยาม LCA ว่า “เป็นกระบวนการที่ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาถึงกระบวนการผลิต รวมถึงกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่อง ในลักษณะของวัตถุดิบ และพลังงาน ซึ่งการประเมินจะรวมทั้งวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการผลิต การบรรจุ การคัดแยก การบำรุงรักษา การนำกลับมาใช้ใหม่ และรวมถึงกิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยยึดหลักนิเวศวิทยา สุขอนามัย และการนำทรัพยากรสิ้นเปลืองมาใช้เป็นหลัก” (Henrik, 1997) แสดงดังภาพประกอบที่ 1-1

ISO (International Standard for Organization) กล่าวว่า การประเมินวัฏจักรชีวิต “เป็นเทคนิคในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมซึ่งเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ หรือการบริการตลอดวงจร

ชีวิต เริ่มจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ และพลังงาน การขนส่ง การผลิตผลิตภัณฑ์ การบรรจุ การบำรุงรักษา การใช้ และการจัดการกับผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุ" (นงค์นุช พฤฒิชัยวิบูลย์, 2547)

การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เป็นวิธีการประเมินประเด็นปัญหา และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวเนื่องกับผลิตภัณฑ์ทั้งวงจร ตั้งแต่ การออกแบบ การใช้พลังงาน และวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้ผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการจำจัดของผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ (พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, 2544)

การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ หมายถึง กระบวนการในการประเมินประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม และประเด็นผลกระทบที่มีศักยภาพ ของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เริ่มต้นไปจนสิ้นสุดอายุของผลิตภัณฑ์นั้นๆ (Kimura *et al.*, 2001)



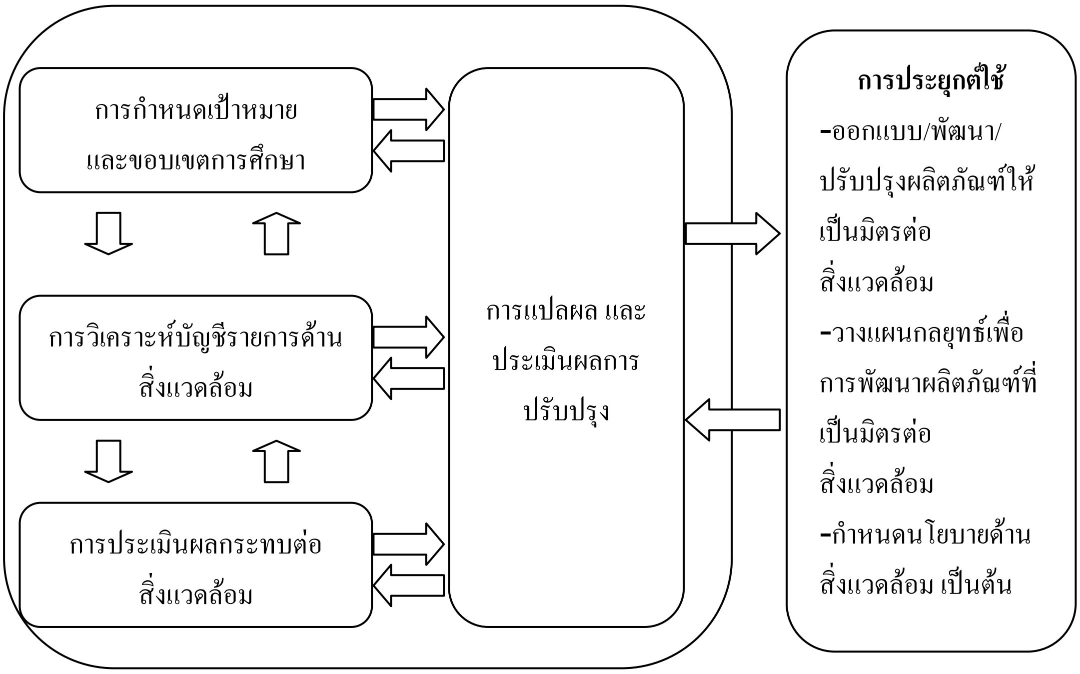
ภาพประกอบที่ 1-1 วัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า LCA คือ เครื่องมือที่พิจารณานำไปสู่การประเมินลักษณะของสิ่งแวดล้อม และความเป็นไปได้ของผลกระทบที่มีส่วนตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์หรือตลอดกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ (Guinee *et al.*, 2000) ใช้สำหรับประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์หรือบริการต่างๆ โดยครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบ การสกัดวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้งานรวมไปถึงการใช้ซ้ำ การหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ และการกำจัดทิ้งหลังหมดอายุการใช้งานในเชิงปริมาณ หรือเรียกได้ว่าตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle to Grave) ของผลิตภัณฑ์รวมถึงศึกษาปริมาณพลังงาน วัตถุดิบ ของเสียที่ปล่อยออกมาทั้งทางน้ำ ดิน และอากาศ พิจารณา

ครอบคลุมไปถึงระบบนิเวศน์ สุขอนามัย และปัญหาสิ่งแวดล้อมระดับโลก ซึ่งไม่มีการกำหนดระยะเวลา (ประเสริฐ และคณะ, 2547) เพื่อหาวิธีการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เกิด ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ช่วยในการตัดสินใจ หาทางเลือกเพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ง่ายขึ้น เป็นกระบวนการศึกษาที่ละเอียด และเป็นระบบ เนื่องจากมีการกำหนดวัตถุประสงค์ในการศึกษา ไม่ใช้ความเชื่อในการตัดสินใจ เข้าใจง่าย พิสูจน์ได้ และให้คำตอบที่เป็นรูปธรรมเนื่องจากใช้ข้อมูลเชิงปริมาณ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์ (Rivela *et al.,* 2004) สามารถนำมาเป็นเกณฑ์ในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดได้ ดังนั้น LCA จึงเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ดี และน่าเชื่อถือ

1.2.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

การทำ LCA ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 1-2



ภาพประกอบที่ 1-2 กรอบการดำเนินงาน LCA ตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040
ที่มา : คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (2549)

1.2.2.1 การกำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตการประเมิน (Goal and Scope Definition)

การกำหนดเป้าหมาย (Goal) เป้าหมายหลักของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ คือ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ดังนั้น เป้าหมายควรกระชับ และชัดเจน เพราะจะมีผลต่อขั้นตอนต่อๆ ไปได้ เช่น การกำหนดขอบเขต เป้าหมายที่แน่ชัดย่อมนำไปสู่คำตอบที่รวดเร็ว และสิ้นเปลืองน้อยที่สุด เป้าหมายที่วางไว้จะสำเร็จมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับขอบเขตการศึกษา เนื่องจากข้อมูลที่ได้ต้องนำไปใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้น ถ้าข้อมูลสมบูรณ์ตามขอบเขตที่กำหนดก็จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ บรรลุผลตามเป้าหมายที่วางไว้

การกำหนดขอบเขต (Scope) คือ การกำหนดขอบเขตของการศึกษาเพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ โดยปกติการทำ LCA สามารถพิจารณาขอบเขตการศึกษาเต็มรูปแบบ (Cradle to Grave) หรือไม่เต็มรูปแบบ (Cradle to Gate) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และวัตถุประสงค์ของผู้ประเมิน เพื่อให้แน่ใจได้ว่ารายละเอียดในการศึกษามีความเกี่ยวข้อง และเพียงพอต่อเป้าหมายที่ตั้งไว้ภายใต้ขอบเขตของระบบที่กำหนดขึ้นในการศึกษา ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างผลิตภัณฑ์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการกำหนดขอบเขตจึงเป็นขั้นตอนที่จำเป็น และมีความสำคัญสำหรับการทำ LCA

การกำหนดหน่วยการทำงานของผลิตภัณฑ์ (Functional Unit: FU) คือ การกำหนดหน่วยการอ้างอิงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ที่นำมาประเมินผลกระทบ

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจ และสังคม (2549) กล่าวว่า ปัญหาหลักของการประเมินวัฐจักรชีวิต คือ การเก็บรวบรวมข้อมูลให้มีความสมบูรณ์ ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีหน่วยงานใดที่สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลที่มีความถูกต้องเชิงปริมาณได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น เพื่อช่วยให้สามารถมีการประเมินวัฏจักรชีวิตในระดับหน่วยงานได้ ผู้ประเมินสามารถกำหนดเป้าหมายของการประเมินให้มีระดับต่างกัน ซึ่งในแต่ละระดับมีความต้องการความละเอียดของข้อมูลที่ต่างกันออกไป โดยเป้าหมายของการประเมินสามารถแบ่งตามระดับได้ดังนี้

- เพื่อวิเคราะห์จุดอ่อน และจุดแข็งของผลิตภัณฑ์
- เพื่อการออกแบบ/ปรับปรุงผลิตภัณฑ์
- เพื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์
- เพื่อการจัดทำฉลากสิ่งแวดล้อม

1.2.2.2 การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Life Cycle Inventory Analysis: LCI)

วัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์บัญชีรายการ เพื่อคำนวณปริมาณการใช้ทรัพยากร วัตถุดิบต่างๆ และปริมาณการปล่อยของมลพิษต่างๆ สู่สิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ที่พิจารณา โดยอ้างอิงจากหน่วยทำงาน (FU) ที่ผู้ประเมินกำหนดขึ้นมาตามความเหมาะสม การเก็บข้อมูลเพื่อทำบัญชีรายการเป็นขั้นที่ยุ่งยาก และเสียเวลามากที่สุดในการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ และเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากที่สุด เพราะความถูกต้องของการประเมินขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลเหล่านี้ แต่จนปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานของการเก็บข้อมูลที่แน่นอน เนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่มักเป็นข้อมูลที่ผู้ประเมินนำมาวิเคราะห์เอง และประมาณการของรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อมเท่านั้น ไม่ได้เป็นข้อมูลตามจริงจากการรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อมประจำปีของโรงงานในประเทศไทย จึงทำให้การค้นหาข้อมูลทุติยภูมิเป็นไปได้ยากและไม่เพียงพอ (ประเสริฐ และคณะ, 2547)

Pluimers (2001) ได้กล่าวว่า วิธีการจำแนกระบบสิ่งแวดล้อมต้องครอบคลุมถึงการรวบรวมความสัมพันธ์ของระบบมวลสารเข้า และสารออกไปจนถึงจำแนกรายการต่างๆ ของกระบวนการผลิตที่ต้องพิจารณา และส่วนที่สามารถยกเว้นได้ นอกจากนี้เกี่ยวกับการเก็บข้อมูลจากโรงงาน “เป็นไปได้ยากมากที่จะได้ข้อมูลดัชนีตัวเลขทางด้านสิ่งแวดล้อมจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ และกระดาษ ข้อมูลดังกล่าว เช่น ค่า AOX (Absorbable Organic Halides) TRS (Total Reduced Sulfur) และ NMVOC (Non Methane Volatile Organic Compounds) ซึ่งเป็นข้อมูลของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ” (TEI, 1999)

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจ และสังคม (2549) ได้กล่าวถึงลักษณะข้อมูลที่ดีที่ควรนำมาใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ดังนี้

- ควรมีรายละเอียดข้อมูลสารเข้า และสารออก รวมถึงมลพิษที่ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน
- ควรมีรายละเอียดการใช้ระบบสาธารณูปโภค เช่น น้ำ เชื้อเพลิงรวมทั้งไฟฟ้าและไอน้ำสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท
- ควรมีรายละเอียดข้อมูลการขนส่งที่ชัดเจน
- ควรมีรายละเอียดปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในแต่ละผลิตภัณฑ์
- ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ควรเป็นข้อมูลที่สอดคล้องกับพื้นที่ ที่ต้องการประเมินผลกระทบ เพราะข้อมูลที่ได้จากพื้นที่อื่นๆ อาจไม่บ่งบอกผลกระทบแท้จริงที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ศึกษา

ขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการมีดังนี้

1) สร้างแผนผังวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ โดยจำแนกเป็นหน่วย (Unit) ย่อยๆ ที่สำคัญในตลอดวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการศึกษา เช่น การผลิตกระดาษต้องมีหน่วยของการปลูกต้นยูคาลิปตัสเพื่อนำมาทำกระดาษ หน่วยของการเก็บเกี่ยว หน่วยการขนส่ง หน่วยการผลิตเยื่อกระดาษ หน่วยการผลิตกระดาษ หน่วยการใช้สารเคมี หน่วยการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2) จำแนกกิจกรรมต่างๆ ของแต่ละหน่วยที่ทำการจำแนกข้างต้น เช่น กิจกรรมการใช้ปุ๋ยอยู่ในหน่วยของการปลูกต้นยูคาลิปตัสเพื่อนำมาทำกระดาษ

3) คำนวณการใช้ทรัพยากร และมลพิษที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละกิจกรรมของแต่ละหน่วยในวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์

Lopes *et al.* (2003) กล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการว่า ควรหลีกเลี่ยงการปันส่วนข้อมูล เพราะจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล และหากหลีกเลี่ยงไม่ได้อาจต้องใช้การปันส่วนข้อมูลโดยอาศัยข้อมูลมวลสารเข้า และข้อมูลมวลสารออก เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์ร่วม

4) สรุปผลรวมของบัญชีรายการต่างๆ ในรูปของตาราง หรือรูปแบบอื่นที่เข้าใจง่าย

โดยปกติการสรุปผลรวมของบัญชีรายการต่างๆ อยู่ในรูปของค่าการปลดปล่อยมลพิษของสารแต่ละชนิด และหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม คูณกับ ค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Factor) ดังสมการที่ (1-1)

$$Emission\ Score = Activity \times Emisssion\ \ factor \qquad (1\text{-}1)$$

ขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จะออกมาในรูปของตัวเลข นั่นคือ ปริมาณหรือค่าการปลดปล่อยมลพิษต่างๆ ที่เรียกว่า Emission Score ของผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ ที่ทำการพิจารณา เช่น กิจกรรมการใช้ปุ๋ยจากการปลูกยูคาลิปตัส ก่อให้เกิดมลพิษ คือ N_2O NO_x NO_3^- และ PO_4^{3-} โดยมีค่าการปลดปล่อยมลพิษ ดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ตัวอย่างค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) จากการใช้ปุ๋ยในการปลูกยูคาลิปตัส

ดัชนีก่อมลพิษ	**ค่าตัวคูณมลพิษ (Emission Factor)**	**หน่วย**	**ค่าการปลดปล่อย (Ton/yr)**
การใช้ปุ๋ย N (1,055 ตัน/ปี)			
N_2O	0.03	kg N_2O-N/kg N	32
NO_x	0.025	kg NO_x-N/kg N	26
NO_3^-	0.35	kg NO_3^--N/kg N	369
การใช้ปุ๋ย P (1,055 ตัน/ปี)			
PO_4^{3-}	0.2	Kg PO_4^{3-}-N/kg N	211

ที่มา : IPCC (1997)

1.2.2.3 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

เป็นขั้นตอนการคำนวณเพื่อแปลงข้อมูลผลสรุปบัญชีรายการ (Emission Score) ที่ได้จากการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อให้อยู่ในรูปของผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่คัดเลือกตามความเหมาะสม โดยข้อมูลจะถูกแยกออกเป็นหมวดหมู่ (Classification) ตามชนิดของผลกระทบสิ่งแวดล้อมนั้นๆ และผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ ปริมาณผลกระทบที่เกิดขึ้น (Effect Score) ชนิดหรือประเภทของผลกระทบที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ต้องสอดคล้องกันกับความเป็นพิษของมลพิษต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักร อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ต้องการศึกษาด้วย และโดยทั่วไปกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมพื้นฐานที่ใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมมีดังนี้ (คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิตและการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ, 2006)

- ศักยภาพที่ทำให้ทรัพยากรธรรมชาติประเภทที่ไม่สามารถทดแทนได้ลดลง (Abiotic Depletion Potential)
- ศักยภาพที่ทำให้ทรัพยากรพลังงานลดลง (Energy Depletion Potential)
- ศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential)
- ศักยภาพในการทำให้โอโซนในชั้นบรรยากาศลดลง

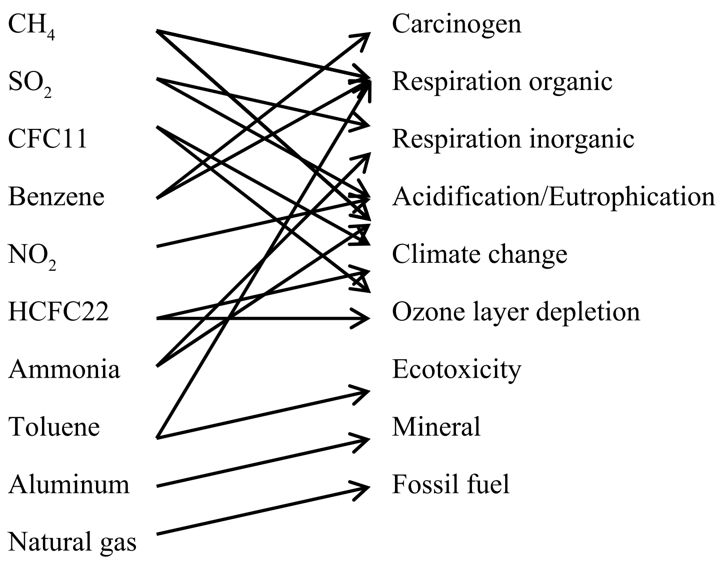
(Ozone Depletion Potential)

- การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Toxicity)
- การก่อให้เกิดความเป็นพิษทางบก และทางน้ำ (Aquatic/Terrestrial Ecotoxicity)
- ศักยภาพในการทำให้เกิดฝนกรด (Acidification Potential)
- การออกซิเดชั่นที่เกิดจากปฏิกิริยาแสงเคมี (Photo-Chemical Oxidation)
- การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหาร (Eutrophication)

ซึ่งมีขั้นตอนการประเมิน ดังนี้

1) การจำแนกชนิดของปัญหา (Classification)

การจำแนกข้อมูลในบัญชีรายการให้อยู่ในกลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่คัดเลือกไว้ แสดงดังภาพประกอบที่ 1-3 ซึ่งมีข้อควรระวัง คือ การจำแนกซ้ำ เนื่องจากสารบางตัวอาจเป็นสาเหตุของกลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าหนึ่งประเภท เช่น NO_x ที่เกิดจากขั้นตอนการใช้ปุ๋ยปลูกยูคาลิปตัส และการขนส่งมีผลต่อการเกิดผลกระทบโดยตรง คือ Eutrophication และ Acidification (Jawjit *et al.,* 2006) ในกรณีที่เป็นผลกระทบต่อเนื่องไม่ควรจำแนกซ้ำ เช่น Acidification ที่มีสาเหตุมาจากการปลดปล่อยก๊าซ NO_x ออกสู่บรรยากาศ สามารถทำให้เกิดการสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพได้ด้วย เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 1-3 การจำแนกมลสารต่างๆ เข้ากลุ่มตามประเภทของผลกระทบสิ่งแวดล้อม
ที่มา : ดัดแปลงจาก จันจิรา หะยียามา (2547)

2) การกำหนดบทบาท (Characterization)

การแปลงข้อมูลให้เป็นค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยข้อมูลที่ได้จากการจำแนกกลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อมจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยใช้ตัวชี้วัดตามหน่วยมาตรฐานที่ได้จากการเทียบค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมของสารดังกล่าวกับสารอ้างอิงพื้นฐาน เรียกว่า (Equivalent or Characterization Factor: CF) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงศักยภาพของสารนั้นๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงตามกลุ่มที่จำแนกไว้ซึ่งเมื่อนำค่า CF ของสารที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละผลกระทบสิ่งแวดล้อม คูณกับ Emission Score ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการ จะได้ค่า Effect Score ออกมาซึ่งเป็นค่าผลกระทบรวมที่เกิดขึ้นในแต่ละผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่คัดเลือกไว้ ดังสมการที่ (1-2)

$$Effect\ Score = Emission\ Score \times Characterization\ \ factor \qquad (1\text{-}2)$$

ดังนั้น ค่าที่ได้ออกมาจะมีหน่วยเทียบเหมือนกันในแต่ละประเภทของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น เช่น Global Warming มีหน่วยเทียบ คือ น้ำหนักเทียบเท่า CO_2 (CO_2-eq) ดังตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-2 ตัวอย่างตัวคูณผลกระทบสิ่งแวดล้อม หรือค่าความสามารถจำเพาะ (Characterization Factor) ในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน

ผลกระทบสิ่งแวดล้อม	**ดัชนีการก่อมลพิษ (1 kg Pollutant)**	**Characterization Factor (kg -CO_2-eq)**
Global Warming	CO_2	1
	CH_4	23
	N_2O	296

ที่มา : IPCC (2001)

โดยทั่วไปการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ จะจบการดำเนินการเพียงแค่การกำหนดบทบาท (Characterization) นอกเหนือจากนี้เป็นส่วนเสริมที่ผู้ทำการศึกษาต้องการศึกษาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป

3) การเทียบขนาดผลกระทบ (Normalization)

ขั้นตอนการหาความสำคัญของศักยภาพในแต่ละผลกระทบที่มีความสัมพันธ์ต่อผลกระทบที่เกิดจากกิจกรรมของสังคมในภาพรวม ขั้นตอนนี้จะทำการเทียบหาค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ในที่นี้ คือ กระดาษพิมพ์เขียนต่ออายุการใช้งาน และสัดส่วนของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมนั้นๆ ต่อคนต่อปี (นรรัตน์ รอดประเสริฐ, 2548) หรือกล่าวได้ว่า เป็นการเทียบขนาดผลกระทบแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนภายใต้ขอบเขตที่กำหนด กับขนาดของผลกระทบที่ต้องการศึกษา เช่น ระดับโลก ระดับภูมิภาค หรือระดับท้องถิ่น เป็นต้น

4) การให้น้ำหนัก (Weighting)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเปรียบเทียบการใช้ทรัพยากร และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้วิจัย หรือการนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ การให้น้ำหนักกับผลกระทบที่เกิดขึ้นภายใต้วัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาในที่นี่ คือ กระดาษพิมพ์เขียน โดยนำ Weighting Factor มาคูณผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ Normalization ผลที่ได้สุดท้ายจะชี้ให้เห็นถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อม ที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายใต้วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนตามขอบเขตที่กำหนด (นรรัตน์ รอดประเสริฐ, 2548) หรือกล่าวได้ว่า เป็นการจัดลำดับความสำคัญของผลกระทบที่เกิดขึ้น

ภายใต้การพิจารณาที่ผู้วิจัยเห็นสมควร จากข้อมูลที่มีอยู่ จากนโยบายที่ผู้วิจัย หรือโรงงานให้ความสำคัญ และรวมผลที่ได้เหล่านั้น เป็นค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมดเพียงค่าเดียว (Single score)

1.2.2.4 การแปลผลการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Interpretation)

ขั้นตอนนี้ทำให้ทราบว่าช่วงใดในวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญสูงสุด รวมถึงแหล่งที่มาของประเด็นปัญหา และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้นๆ ทั้งนี้การตีความ และแปรผลจะต้องอยู่บนพื้นฐานของขอบเขตการศึกษา วัตถุประสงค์ของการศึกษาในการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการตีความ แปรผล และการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อมมี 3 ขั้นตอน ได้แก่

1) การจำแนกทางเลือกในการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อมที่เป็นไปได้

ควรพิจารณาทุกช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดมลพิษ และของเสียทั้งมวลสารเข้า และมวลสารออก ให้ความสำคัญกับช่วงชีวิตที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุด เพื่อจำแนกทางเลือกในการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อมที่เป็นไปได้ทั้งหมด เช่น การเปลี่ยนเทคโนโลยีการผลิต การเปลี่ยนรูปแบบการผลิต การเปลี่ยนหรือลดวัตถุดิบ เป็นต้น

2) การวิเคราะห์เพื่อประเมินทางเลือกในการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม

คือ ขั้นตอนของการประเมินทางเลือกที่มีทั้งหมดเพื่อการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม โดยในแต่ละทางเลือกจะวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเทคนิค และต้นทุนเพื่อให้ได้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกที่ดี เป็นไปได้ และเหมาะสมที่สุด

3) การคัดเลือกทางเลือกในการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม

ข้อมูลจากการประเมินผลเพื่อการปรับปรุง สามารถนำไปใช้สนับสนุนการวิเคราะห์ โดยเรียงลำดับทางเลือกตามความเป็นไปได้ในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่นำมาประกอบการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดี และเหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ต้นทุนในการปรับปรุง การยอมรับของสังคม และผลกระทบต่อระบบการจัดการที่ตามมา เป็นต้น

1.2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543) ได้ศึกษาเรื่องการประเมินวัฏจักรชีวิตของเสื้อเชิ้ตชายที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยแบ่งการประเมินออกเป็น 5 ช่วง คือ ช่วงการเตรียมวัตถุดิบ ช่วงการผลิต ช่วงการขนส่ง ช่วงการใช้งาน และ

ช่วงการกำจัด พบว่า ช่วงการใช้งานก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เนื่องจากการใช้พลังงานในการซัก และรีดผ้า และเมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่นำมาผลิต พบว่าเส้นใยสังเคราะห์มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเพื่อลดการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากมีคุณสมบัติทำให้ผ้าแห้งเร็ว และรีดง่ายซึ่งลดการใช้พลังงานได้

เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล (2544) ได้ศึกษาเรื่องการประเมินวัฏจักรชีวิตของตู้เย็นพาณิชย์รุ่น CRB 120 โดยใช้วิธี Numerical Environmental Total Standard: NETS และโปรแกรม SIMAPRO ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการผลิต และเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสารทำความเย็นจาก R 12 เป็น R 134a พบว่า ตู้เย็นพาณิชย์ที่ใช้สารทำความเย็น R 12 มีค่าประสิทธิภาพทางด้านพลังงานของระบบเท่ากับ 8.75 Btu/h/W ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมดเท่ากับ 43.78 NETS และ 11.4 PE_T และตู้เย็นที่ใช้สารทำความเย็น R 134a มีค่าประสิทธิภาพทางด้านพลังงานของระบบเท่ากับ 5.58 Btu/h/W ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมดเท่ากับ 56.4 NETS และ 16.6 PE_T และพบว่า ตู้เย็นพาณิชย์ที่ใช้สารทำความเย็น R 134a ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้สารทำความเย็น R 12 เนื่องจากมีอัตราการใช้ไฟฟ้ามากกว่า ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมดสูงกว่า

นงค์นุช พฤฒิชัยวิบูลย์ (2547) ได้ศึกษาเรื่องการประเมินวัฏจักรชีวิตของคอมเพรสเซอร์แบบหมุนขนาด 18,000 Btu/hr โดยแบ่งการประเมินเป็น 4 ช่วงตลอดวัฏจักรชีวิต คือ ช่วงการผลิต ช่วงการใช้งาน ช่วงการขนส่ง และช่วงการกำจัด โดยใช้วิธีการประเมิน Eco-Indicator 99 จากโปรแกรม SIMAPRO 5.1 พบว่าช่วงการใช้งานก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเท่ากับ 9.45 kPt. (kilo-Eco-Points) (Martinez *et al.,* 2009) คือ ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นต่อมนุษย์ 1 คน/ปี รองลงมา คือ ช่วงการผลิต ช่วงการขนส่ง และช่วงการกำจัด ตามลำดับซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบเท่ากับ 0.0015 kPt. 0.000198 kPt. และ -0.00125 kPt. และเมื่อนำวีธีการประเมินแบบ NETS มาใช้เพื่อเปรียบเทียบ พบว่าผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการประเมินโดยใช้โปรแกรม SIMAPRO

สุรศักดิ์ วิทย์ศลาพงษ์ (2548) ทำการรวบรวมฐานข้อมูลการใช้ทรัพยากร พลังงาน และของเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตตู้เย็นที่ใช้ในบ้าน ขนาดประตู 6.3 ลูกบาศก์ฟุต โดยใช้โปรแกรม SIMAPRO 6.0 ด้วยวิธี Environmental Design of Industrial Products: EDIP พบว่าขั้นตอนการใช้งานก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 83 ของทั้งวัฏจักรชีวิต เนื่องจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งาน รองลงมา คือ ขั้นตอนการผลิตคอมเพรสเซอร์คิดเป็นร้อยละ 5 และขั้นตอนการฉีดโฟมในตัวโครงตู้เย็นคิดเป็นร้อยละ 4 ตามลำดับ

เพชรดา บัวสมบูรณ์ (2551) ประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีฝังกลบขยะมูลฝอยชุมชน 1 ตัน พิจารณาตั้งแต่ การรับขยะเข้าโรงงาน การคัดแยก การอัด-ห่อ การขนส่ง การฝังกลบ และการบำบัดมลพิษจากหลุมฝังกลบ โดยใช้โปรแกรม SIMAPRO 7.1 วิธี Eco-Indicator 95 กลุ่มผลกระทบหลักที่สนใจ คือ สภาวะโลกร้อน การใช้พลังงาน และสภาวะฝนกรด พบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการฝังกลบ และเมื่อพิจารณาแต่ละกลุ่มผลกระทบ พบว่า สภาวะโลกร้อนและสภาวะฝนกรดมีสาเหตุหลักมาจากขั้นตอนการฝังกลบ ส่วนการใช้พลังงานเกิดจากขั้นตอนการเก็บขนขยะ

จุฑาภรณ์ คนใหม่ (2552) ประเมินวัฏจักรชีวิตจากการผลิตโครงเครื่องรับโทรทัศน์จากโพลีสไตรีน 1 ชิ้น น้ำหนัก 1.45 กิโลกรัม ขนาด 21 นิ้ว แบ่งขั้นตอนการประเมินเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิตโครงเครื่องรับโทรทัศน์ และขั้นตอนการจัดการหลังหมดอายุ (ฝังกลบ เผา นำกลับไปใช้ใหม่) โดยใช้โปรแกรม SIMAPRO 7.0 ด้วยวิธี Eco-Indicator 99 ซึ่งเน้นการพิจารณาผลกระทบปลายทาง พบว่า ขั้นตอนการผลิตโครงเครื่องรับโทรทัศน์ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุดจากกิจกรรมการฉีดพ่นชิ้นงานร้อยละ 58 กิจกรรมการฉีดพลาสติกร้อยละ 24 และการอบชิ้นงานร้อยละ 13 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตด้วยพีวีซี พบว่า กิจกรรมการฉีดขึ้นรูปโครงเครื่องรับโทรทัศน์ที่ผลิตด้วยโพลีสไตรีนก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์น้อยกว่า 1.38 เท่า

สรรเพชุดา เถื่อนทองคำ (2553) ประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตน้ำยางข้น 1 ตัน โดยใช้โปรแกรม SIMAPRO 7.1 ด้วยวิธี Eco-Indicator 99 แบ่งการประเมินออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การรับน้ำยางสดจากเกษตรกร การผลิต การจัดเก็บ การบำบัดน้ำเสีย และการผลิตยางสกิมบล็อกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดจากหางน้ำยาง พบว่า ผลกระทบจากการใช้ไฟฟ้าเนื่องจากการผลิตไฟฟ้าใช้ในการปั่นเหวี่ยงน้ำยางสดเพื่อให้ได้น้ำยางข้นในขั้นตอนการผลิตเป็นสาเหตุหลักในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมร้อยละ 60 ของการเกิดผลกระทบทั้งหมด รองลงมา คือ ผลกระทบจากการใช้น้ำมันดีเซลเพื่อขนส่งน้ำยางสด การใช้แอมโมเนียเพื่อการรักษาสภาพน้ำยาง และการใช้กรดซัลฟูริกเพื่อจับยางออกจากหางน้ำยาง

Hospido *et al.* (2003) ประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตนม 1 ลิตร ขอบเขตการศึกษา คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ การผลิตอาหารสัตว์ และการผลิตนมในโรงงาน ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่นำมาใช้ในการประเมินครั้งนี้ คือ การเกิดสภาวะโลกร้อน การลดลงของ O_3 ในชั้นบรรยากาศ การเกิดสภาวะฝนกรด การเกิดสภาวะยูโทรฟิเคชั่น การเกิดสภาวะหมอกควันพิษ และการลดลงของแหล่งทรัพยากร พบว่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ สภาวะยูโทรฟิเคชั่น ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ และผลิตอาหารสัตว์ และเมื่อศึกษาทางเลือกเพื่อแก้ไขปัญหา

พบว่า การจัดการฟาร์มที่ดีส่งผลต่อการลดลงของผลกระทบ Eutrophication ได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถลดสารประกอบอินทรีย์ และ COD ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นได้มากถึงร้อยละ 90

Rivela *et al.* (2004) ประเมินวัฏจักรชีวิตของการฟอกหนังด้วยสารฟอกเกลือ แบ่งขั้นตอนการประเมิน 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ (หนังสด) การฟอกหนัง และการฟอกหนังซ้ำ พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นปลายทางเป็นหลัก คือ ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศ และผลกระทบต่อแหล่งทรัพยากรที่ไม่สามารถทดแทนได้ พบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นส่งผลต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เป็นหลักจากขั้นตอนการฟอกหนังทั้ง 2 ขั้นตอนคิดเป็นร้อยละ 73 รองลงมาคือ ผลกระทบต่อแหล่งทรัพยากรที่ไม่สามารถทดแทนได้คิดเป็นร้อยละ 9 สำหรับผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์มีสาเหตุหลักมาจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการฟอกหนังและฟอกหนังซ้ำ มากถึงร้อยละ 69 ของการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ทั้งหมด

Lundie and Peter (2005) ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของการจัดการของเสียประเภทอาหารของประเทศสเปน ซึ่งใช้โปรแกรมสำเร็จรูป GaBi (เยอรมันเป็นผู้ผลิตโปรแกรม) ในการประเมิน แบ่งแนวทางการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบวิธีการจัดการออกเป็น 4 แนวทาง คือ การจัดการจากผู้ก่อให้เกิดของเสียประเภทอาหาร การจัดการโดยการทำปุ๋ยภายในครัวเรือน การจัดการโดยเทศบาล (ทำปุ๋ย) และการกำจัดขั้นสุดท้าย (ฝังกลบ) พบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีส่วนในการจัดการทั้ง 4 แนวทาง คือ ชีวิตความเป็นอยู่ของคนในพื้นที่ที่ศึกษา ซึ่งหากใช้วิธีการจัดการจากผู้ที่ก่อให้เกิดของเสียประเภทอาหาร สามารถลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด นอกจากนี้ พลังงานที่ใช้ในการผลิตอาหาร การขนส่ง การเก็บรวบรวม และการกำจัด ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม

เนื่องจากการศึกษาการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตมีตัวเลข และข้อมูลเข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นจำนวนมากประกอบกับการทำ LCA มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อน และเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลหลายส่วน การมีโปรแกรมสำเร็จรูปเฉพาะสำหรับ LCA มาใช้ในการจัดเก็บข้อมูลจะทำให้มีความสะดวก รวดเร็วให้กับผู้ใช้ และมีความผิดพลาดอันเกิดจากการคำนวณเองลดลง ปัจจุบันนี้หลายประเทศได้ให้ความสนใจ และพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปขึ้นมาอย่างหลากหลาย แสดงดังตารางที่ 1-3 โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้โปรแกรมแต่ละประเภทประกอบด้วย จำนวนฐานข้อมูล รูปแบบของการแปลผลข้อมูล ภาษาที่ใช้ ราคา ข้อดี ข้อเสีย การให้ทดลองใช้โปรแกรม ความยากง่ายในการศึกษา ความหลากหลายของวิธีที่ใช้ในการประเมินผลกระทบ ความยืดหยุ่น และการสร้างฐานข้อมูลใหม่ ความเหมาะสม และความเฉพาะเจาะจงของฐานข้อมูล เป็นต้น (คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิต และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ, 2006)

ตารางที่ 1-3 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการศึกษา LCA ที่มีอยู่ในท้องตลาด

ประเทศ	ชื่อโปรแกรม	ผู้ผลิตโปรแกรม	เว็บไซต์
ญี่ปุ่น	NIRE-LCA	AIST	www.unit.aist.go.jp/lca-cent
	JEMAI-LCA	JEMAI	www.jemai.or.jp
เนเธอร์แลนด์	CMLCA	CML	www.leidenuniv.nl/cml/ssp
	SIMAPRO	Pre Consultants B.V.	www.pre.nl
	CEDA	CML and Envirolnformatica, Co.	www.enviroinformatica.com
	EcoScan life	TNO	www.ecoscan.nl
เยอรมัน	Umberto	Lfi Hamburg GmbH	www.umberto.de
	GaBi	PE Europe GmbH	www.gabi-software.com
	OGIP	t.h.e. Software GmbH	www.the-software.com
	GEMIS	Oeko-Institut	www.oeko.de
	LEGEP	LEGEP Software GmbH	www.legep.de
ฝรั่งเศส	TEAM	Ecobilan S.A.	www.ecobilan.com
	EIME	CODDE	www.codde.fr
	WISARD	Ecobilan S.A.	www.ecobilan.com
สหรัฐอเมริกา	EIO-LCA	Carnegie Mellon University	www.eiolca.net
	TRACI	U.S. EPA	http://epa.gov/ORD/NRM RL/Std/sa/iam_traci.htm
สวีเดน	EPS 2000	Asswss EcostrateguyScandinavia	www.assess.se
	LCAiT	CIT Ekologik AB	www.lcait.com
	WWLCAW	IMI	http://workshop.imichal mers.se/

ที่มา : คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิต และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (2549)

1.2.4 โปรแกรมการประเมินวัฏจักรชีวิต

1.2.4.1 โปรแกรม SIMAPRO

โปรแกรมการประเมินวัฏจักรชีวิต SIMAPRO ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยบริษัท Pre Consultant B.V. ประเทศเนเธอร์แลนด์ ตั้งแต่ปี 1990 เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ต่างๆ การคำนวณในโปรแกรมการประเมินวัฏจักรชีวิตทางสิ่งแวดล้อม SIMAPRO ได้นำหลักการ การคำนวณของ EDIP (Environmental Design of Industrial Products) มาใช้ ซึ่งการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรม SIMAPRO มีวิธีการดังต่อไปนี้

1) Characterization

คือ ขั้นตอนในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมลภาวะที่ปล่อยออกมา กับผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ในกรณีสภาวะโลกร้อน มีก๊าซ หรือสารมลพิษชนิดใดบ้าง ที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน และก๊าซ หรือสารต่างๆ เหล่านั้นจะถูกทำให้อยู่ในรูปของ CO_2-equivalent คือ การทำให้อยู่ในหน่วยเปรียบเทียบเดียวกันทั้งหมด แล้วนำมารวมกัน ผลที่ได้คือ ค่า Effect Score ซึ่งเป็นค่าการประเมินผลกระทบรวมที่เกิดขึ้นจากสภาวะโลกร้อน

2) Normalization

คือ ขั้นตอนในการหาความสำคัญของศักยภาพในแต่ละผลกระทบที่มีความสัมพันธ์ต่อผลกระทบที่เกิดจากกิจกรรมของสังคมในภาพรวม โดยผลที่ออกมาจะได้ ค่า Normalized Effect Score ซึ่งเป็นค่าที่ถูกปรับหน่วยให้อยู่ในหน่วยปกติเดียวกันทั้งหมดของผลกระทบที่เกิดขึ้นทุกประเภทเพื่อสามารถนำมารวมกันได้เป็นผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมดเพียงค่าเดียว (Single Score) ที่เกิดขึ้นในการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ

3) Weighting

โดยขั้นตอนนี้ เป็นขั้นตอนสำหรับการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับผู้ประเมิน เช่น อาจนำประเด็นทางสังคม เศรษฐกิจ หรือมีการนำนโยบายสิ่งแวดล้อมโลกในการลดมลภาวะแต่ละชนิด นำกฎหมายสิ่งแวดล้อมของแต่ละประเทศในการอนุญาตให้ปล่อยมลพิษแต่ละชนิดมาตั้งเป็นค่าตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) และผลลัพธ์ที่ได้ คือ ค่าผลกระทบรวม (Overall Effect Score) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

1.2.4.2 โปรแกรมการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตเยื่อ และกระดาษในประเทศไทย

ประเสริฐ และคณะ (2547) ได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อจัดทำฐานข้อมูลใหม่ใช้ในการประเมินมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เหมาะกับสถานที่ คือ ประเทศไทย ผู้จัดทำโปรแกรมดังกล่าวอนุญาตให้มีการปรับเปลี่ยนฐานข้อมูลต่างๆ เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับเยื่อ และกระดาษเพื่อให้เหมาะสมกับกรณี และทันสมัยอยู่ตลอดเวลาทั้งนี้เพื่อความถูกต้องในการประเมินวัฏจักรชีวิตของเยื่อ และกระดาษ ผู้ทำการประเมินสามารถป้อนข้อมูลใหม่ลงได้ ตามดัชนีชี้วัดที่กำหนดในโปรแกรม หากนอกเหนือจากดัชนีที่มีอยู่จะไม่มีผลต่อการประเมิน ตัวชี้วัดที่นำมาใช้ในโปรแกรม ใช้การปรับค่าตามข้อแนะนำของ Eco-Indicator 95 และEco-Indicator 99 เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาโดยนักวิชาการ และผู้เชี่ยวชาญในระดับที่น่าเชื่อถือ และนิยมนำมาใช้กันแพร่หลาย (ประเสริฐ และคณะ, 2547)

นอกจากนี้ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วย LCA สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนในครั้งนี้ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้เพื่อการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

1.2.5 แบบจำลอง (Model) ที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลอง (Model) ทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนในครั้งนี้ เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนามาจาก Jawjit *et al.* (2007) มีลักษณะการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน (Integrated Assessment Model) ซึ่งใช้ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตเยื่อยูคาลิปตัสที่ผลิตด้วยกระบวนการคราฟท์โดยมีหลักการการคำนวณอยู่บนพื้นฐานของ Life Cycle Assessment (LCA) และสามารถนำ Multi-Criteria Analysis (MCA) Cost-Effective Analysis (CEA) นโยบายทางสิ่งแวดล้อม และทางเลือกต่างๆ มาใช้เพื่อการคำนวณผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนเดียวได้ ต่างจากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตโดยทั่วไปที่นำตัวแปรมาใช้เพื่อการคำนวณผลกระทบได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น คือ ไม่สามารถนำนโนบาย หรือทางเลือกมาใช้เป็นค่าตัวแปรเพื่อการประเมินผลกระทบพร้อมกันได้ในครั้งเดียว และงานวิจัยของ Jawjit *et al.* (2006) ได้นำแบบจำลองมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตเยื่อเท่านั้นซึ่งไม่ได้พิจารณาการประเมินผลกระทบทั้งวงจรของกระดาษซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการเยื่อยูคาลิปตัส ผู้วิจัยจึงนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนในครั้งนี้ โดยใจความสำคัญของแบบจำลองแบ่งเป็น 4

ส่วน ตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อการคำนวณแสดงดังในตารางที่ 1-4 สำหรับความแตกต่างของ LCA และแบบจำลองที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงไว้ในตารางที่ 1-5

1.2.5.1 ส่วนที่เกี่ยวกับระดับกิจกรรม (Activity level)

จากสมการที่ (1-1) และ (1-2) บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิต (PP) และตัวคูณของระดับกิจกรรมต่างๆ (AF_{α}) ที่ต้องการศึกษา ผลที่ได้คือ ระดับของกิจกรรม (A_{α}) และเพื่อดูประสิทธิภาพของทางเลือก (j) ที่ใช้ในการลดระดับกิจกรรมต่างๆ จึงต้องนำมาคูณกับตัวคูณการลดระดับกิจกรรม (Reduction Factor) ของทางเลือกที่ใช้ในการลดกิจกรรมต่างๆ ($rf_{\alpha,j}$) ดังสมการที่ (1-1)

1.2.5.2 ส่วนที่เกี่ยวกับมลพิษ (Emission)

สมการที่ (1-3) และ (1-4) คือ ผลรวมระหว่างการก่อมลพิษ ($E_{\varepsilon,\alpha}$) และการเกิดมลพิษข้างเคียง ($ES_{\varepsilon,j,\alpha}$) จากการนำทางเลือกมาใช้เพื่อการแก้ไขปัญหามลพิษที่เกิดขึ้น การเกิดขึ้นของผลกระทบข้างเคียงในระดับกิจกรรม เช่น การนำทางเลือกลดการใช้สาร Selective Catalytic Reduction (SCR) มีผลต่อการลดการเกิดมลพิษ NO_x แต่มลพิษข้างเคียง (Side Effect) คือ เกิด N_2O เพิ่มมากขึ้น ซึ่งกรณีดังกล่าวพิจารณาผลกระทบข้างเคียงเป็นลบในการเลือกประยุกต์ใช้ทางเลือก อย่างไรก็ตามผลกระทบข้างเคียงทางบวกก็เป็นไปได้ เช่น การประยุกต์ใช้ทางเลือกเพื่อย่อยเยื่อกระดาษ และฟอกเยื่อกระดาษ มุ่งหวังเพื่อลดการเกิด AOX แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลต่อการลด COD เป็นต้น กล่าวได้ว่า หากทางเลือกที่นำมาใช้เพื่อลดมลสารตัวที่ต้องการลดมีผลข้างเคียงต่อการลด หรือเพิ่มมลสารตัวอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรม สามารถนำผลข้างเคียงมาใช้คำนวณเพื่อการประเมินผลกระทบได้ ดังสมการที่ (1-3)

1.2.5.3 ส่วนที่เกี่ยวกับผลกระทบ (Impact)

ค่า Emission Score (E_{ε}) ที่ได้จากสมการที่ (5) เมื่อนำมาคูณกับตัวคูณผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Characterization Factor) ($CF_{\mu,\varepsilon}$) ดังสมการที่ (6) ผลที่ได้ คือ ค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Impact Score) ($M_{\mu,\varepsilon}$) ต่างๆ ที่ศึกษา ดังสมการที่ (7) ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของหน่วยเปรียบเทียบที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของผลกระทบ เช่น CO_2-eq SO_2-eq เมื่อนำมาหารด้วยค่าการทำให้เป็นปกติ (Normalization Factor) (N_{μ}) ดังสมการที่ (8) และคูณด้วยตัวคูณการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting Factor) ของปัญหาสิ่งแวดล้อม ค่าที่ได้ คือ ค่าผลกระทบรวมทั้งหมด (Total Environment Impact) (M) หรือ (Single Score) เพียงค่าเดียว ที่เกิดขึ้นจากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ดังสมการที่ (9)

1.2.5.4 ส่วนที่เกี่ยวกับค่าใช้จ่าย (Cost)

แสดงการคำนวณค่าใช้จ่ายของทางเลือกต่างๆ และบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดรายปีของทางเลือกในการลดผลกระทบ (C) ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการลงทุนของทางเลือก (CI_j) ค่าใช้จ่ายการดำเนินการของทางเลือก (CO_j) ค่าใช้จ่ายแปรผัน (CV) ของทางเลือกที่นำไปใช้ อัตราดอกเบี้ย (q) และระยะเวลาการใช้งานของทางเลือก (lt_j) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (10)–(13)

Activity level: $$A_\alpha = [A_{\alpha,ref} \times \prod_{j \in J}[(1 - rf_{\alpha,j})] \quad (1\text{-}1)$$

$$A_{\alpha,ref} = PP \times AF_\alpha \quad (1\text{-}2)$$

Emissions: $$E_{\varepsilon,\alpha} = A_\alpha \times F_{\varepsilon,\alpha} \times \prod_{j \in J}[(1-(rf_{\varepsilon,\alpha,j})) \times (1-(1-rf_{\varepsilon,\alpha,j})) \times ....] \quad (1\text{-}3)$$

$$ES_{\varepsilon,j,\alpha} = A_\alpha \times FS_{\varepsilon,j,\alpha} \quad (1\text{-}4)$$

$$E_\varepsilon = \sum_\alpha E_{\varepsilon,\alpha} + \sum_\alpha ES_{\varepsilon,j,\alpha} \quad (1\text{-}5)$$

Impact: $$M_{\mu,\varepsilon} = E_\varepsilon \times CF_{\mu,\varepsilon} \quad (1\text{-}6)$$

$$M_\mu = \sum_\varepsilon M_{\mu,\varepsilon} \quad (1\text{-}7)$$

$$Mn_\mu = M_\mu / N_\mu \quad (1\text{-}8)$$

$$M = \sum_{\mu \in U}(Mn_\mu \times V_\mu) \quad (1\text{-}9)$$

Cost: $$C = \sum_{j \in J}(CI_j + CO_j) + CV \quad (1\text{-}10)$$

$$CI_j = I_j \times q / [1-(1+q)^{-ltj}] \quad (1\text{-}11)$$

$$CO_j = I_j \times f_j \quad (1\text{-}12)$$

$$CV = \sum_\alpha (A_\alpha - A_{\alpha,ref}) \times P_\alpha \quad (1\text{-}13)$$

ที่มา : Jawjit *et al.* (2007)

ตารางที่ 1-4 ความหมายของตัวแปรต่างๆ ในสมการที่นำมาใช้ในการประเมิน

ตัวแปร		**ความหมาย**
α	=	ดัชนีชนิดของกิจกรรม เช่น การใช้ปุ๋ย การฟอกเยื่อโดยสารประกอบคลอรีน การใช้ปูนขาว การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง กำลังการผลิตเยื่อกระดาษ และกำลังการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน
ε	=	ดัชนีชนิดของมลพิษ เช่น CO_2, CH_4, N_2O, SO_2, NO_x, PO_4, COD, P, N, CO, NH_3, NMVOC, TRS, AOX และ Particulates เป็นต้น
μ	=	ดัชนีชนิดของผลกระทบ (ปัญหาสิ่งแวดล้อม) ที่เกิดขึ้น คือ Global Warming, Acidification, Eutrophication, Smog และ Human Toxicity
j	=	ดัชนีทางเลือกในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม
J	=	ทางเลือกที่มีการดำเนินงานร่วมกัน (ส่วนหนึ่งของทางเลือกที่เป็นไปได้)
ref	=	กรณีอ้างอิง (Assumptions for Reference Cases)
A_α	=	ระดับของกิจกรรม α (หน่วยกิจกรรม/ปี)
$A_{\alpha,ref}$	=	ระดับของกิจกรรม α จากกรณีอ้างอิง (Reference Cases Assuming) โดยไม่ควบคุมมลพิษ (กิจกรรม/ปี)
AF	=	ตัวคูณระดับกิจกรรม (Activity Factor)
C	=	ค่าใช้จ่ายทั้งหมดรายปีของทางเลือกในการลดผลกระทบ (บาท/ปี)
CI_j	=	ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการลงทุนของงาทางเลือก j (บาท/ปี)
CO_j	=	ค่าใช้จ่ายการดำเนินการของทางเลือก j (บาท/ปี)
CV	=	ค่าใช้จ่ายแปรผันของทางเลือกที่นำไปใช้ (บาท/ปี)
$CF_{\mu,\varepsilon}$	=	ตัวคูณผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Characterization Factor) μ ของสารมลพิษ ε (หน่วยผลกระทบ/กิโลกรัมมลพิษ ε)
E_ε	=	ค่าการปลดปล่อยมลสาร ε ทั้งหมด (กิโลกรัม/ปี) (Emission Score)
$E_{\varepsilon,\alpha}$	=	ค่าการปลดปล่อยของสารมลพิษ ε จากกิจกรรม α (กิโลกรัม/ปี)
$ES_{\varepsilon,j,\alpha}$	=	การปลดปล่อยมลพิษข้างเคียงที่เกิดจากการใช้ทางเลือก j ในการลดการปลดปล่อยมลพิษ ε (Side Effect)
$F_{\varepsilon,\alpha}$	=	ตัวคูณการปลดปล่อยของสารมลพิษ ε ที่สัมพันธ์กับกิจกรรม α (Emission Factor)

ตารางที่ 1-4 ความหมายของตัวแปรต่างๆ ในสมการที่นำมาใช้ในการประเมิน (ต่อ)

ตัวแปร		ความหมาย
$FS_{\varepsilon,j,\alpha}$	=	ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดจากการใช้ทางเลือก j ในการลดการปลดปล่อยมลพิษ ε
I_j	=	ค่าใช้จ่ายที่ลงทุนไปของทางเลือก j (บาท/ทางเลือก j)
It_j	=	ระยะเวลาการใช้งานของทางเลือก j (ปี)
M	=	ผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวมทั้งหมด (Total Environment Impact)
M_μ	=	ผลกระทบสิ่งแวดล้อม μ (Impact Score) (หน่วยผลกระทบ/ตัน/ปี)
Mn_μ	=	ผลกระทบสิ่งแวดล้อม μ ที่มีการปรับค่าปกติแล้ว (Normalized Effect Score) (fraction)
$M_{\mu,\varepsilon}$	=	ผลกระทบสิ่งแวดล้อม μ จากการปลดปล่อยมลสาร ε (หน่วยผลกระทบ/ปี)
N_μ	=	ตัวคูณค่าทำให้เป็นปกติ (Normalization Factor) ของผลกระทบสิ่งแวดล้อม μ (หน่วยผลกระทบ/ปี)
P_α	=	ราคาของกิจกรรม α (บาท/หน่วยกิจกรรม)
PP	=	กำลังการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (ADt /ปี) และกำลังการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (ตัน/ปี)
V_μ	=	ตัวคูณการให้น้ำหนักความสำคัญของปัญหาสิ่งแวดล้อม μ (Weighting Factor)
q	=	ร้อยละของดอกเบี้ย (%/100 /ปี)
f_j	=	ร้อยละของค่าลงทุน ต่อ ค่าการดูแลรักษาของทางเลือก j (fraction: 0-1)
$rf_{\alpha,j}$	=	ตัวคูณการลดกิจกรรม α โดยใช้ทางเลือก j (fraction: 0-1)
$rf_{\varepsilon,i,j}$	=	ตัวคูณการลดมลพิษ ε จากกิจกรรม α โดยทางเลือก j (fraction: 0-1)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Jawjit *et al.* (2007)

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ไม่นำส่วนที่เกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายมาศึกษา เนื่องจาก ค่าใช้จ่ายส่วนมากจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากโรงงานโดยตรง เพราะเทคโนโลยี วิธีการต่างๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการผลิต และทางเลือกที่นำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลพิษต่างๆ มีความแตกต่าง

กันออกไปในแต่ละโรงงาน และมีแหล่งที่มาหลากหลาย แม้การนำข้อมูลที่มีอยู่มาใช้เพื่อการปันส่วนได้ แต่ก็ควรหลีกเลี่ยง เนื่องจาก ผลที่ได้จากการปันส่วนข้อมูลต่างๆ ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนมากขึ้น (Lopes *et al.,* 2003) รวมถึงระยะเวลาในการเก็บข้อมูลค่อนข้างจำกัด และวัตถุประสงค์ของผู้วิจัยในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยต้องการนำแบบจำลองมาใช้เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น และหาแนวทางการจัดการกับต้นเหตุของการเกิดผลกระทบ โดยศึกษาทางเลือกเพื่อนำมาเป็นแนวทางในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ ซึ่งมี 3 ส่วน คือ ส่วนที่เกี่ยวข้องกับระดับกิจกรรม ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยมลพิษ และส่วนที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ดังนั้น ส่วนของค่าใช้จ่ายต่างๆ จึงไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 1-5 ข้อดี และข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาจาก Jawjit *et al.* (2007) เพื่อใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตเยื่อยูคาลิปตัสที่ผลิตด้วยกระบวนการคราฟท์

	LCA	**MCA**
วัตถุประสงค์	การรวบรวม และประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์	การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวมของทางเลือก โดยใช้เกณฑ์ต่างๆ ที่มีการให้น้ำหนักความสำคัญ
ขั้นตอนการดำเนินงาน	การกำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษา วิเคราะห์บัญชีรายการ ประเมินผลกระทบ และแปลผลการประเมิน	การกำหนดบริบท ระบุเกณฑ์ คะแนน ค่าการให้น้ำหนัก ประเมินผลกระทบรวม และนำผลการประเมินที่ได้ไปวิเคราะห์ความอ่อนไหว
ผลลัพธ์	ผลการประเมินอยู่ในรูปของผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท	ผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวมจากการนำเกณฑ์ต่างๆ เข้ามาใช้ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม
จุดเด่น	หลีกเลี่ยงปัญหาความคลาดเคลื่อนของประเด็น และพื้นที่ที่ศึกษา และนำข้อมูลทุกอย่างที่มีส่วนเกี่ยวข้องตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์มาประเมินผลได้	สามารถให้น้ำหนักความสำคัญกับเกณฑ์ชี้วัดได้ ใช้เกณฑ์ชี้วัดตามขอบเขตที่กำหนด และประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวมได้

ตารางที่ 1-5 ข้อดี และข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาจาก Jawjit *et al.* (2007) เพื่อใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตเยื่อยูคาลิปตัสที่ผลิตด้วยกระบวนการคราฟท์ (ต่อ)

	LCA	**MCA**
ข้อจำกัด	LCA มีขั้นตอนที่ซับซ้อน และไม่สามารถกำหนดระยะเวลา รวมถึงแหล่งที่มาของข้อมูล และต้องทำ Normalization เพื่อการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นซึ่งยากต่อการอธิบายผลที่ได้	MCA ถูกนำไปใช้กับส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตเพื่อวิเคราะห์บัญชีรายการต่างๆ และใช้ความเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ หรือผู้ที่มีส่วนได้ส่วนเสียซึ่งการให้น้ำหนักขึ้นอยู่กับบุคคลเป็นสำคัญ

ที่มา : Hermann *et al.* (2006)

โปรแกรมสำเร็จรูปต่างๆ ที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเพื่อจำแนกข้อมูลเข้ากลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อม และพิจารณาความเป็นไปได้ในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภทตามวิธีการประเมินที่นำมาใช้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ผู้ดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์มักเลือกใช้ชุดกลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อมซึ่งรวมถึงวิธีการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมและวิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบสำเร็จรูป เพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติ เช่น วิธี CML, EPS และ Eco-indicator โดยหลักการ กลุ่มผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และตัวชี้วัดการก่อผลกระทบสิ่งแวดล้อมมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ของการนำผลการประเมินไปใช้ประโยชน์ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการประเมินครั้งนี้ พบว่า การนำ LCA มาใช้เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมกระดาษก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ดังนี้ Global Warming, Acidification, Eutrophication, Smog และ Human Toxicity เป็นส่วนใหญ่ (Sara *et al.,* 2009; Ana *et al.,* 2007; Jawjit *et al.,* 2007; Lopes *et al.,* 2006 and Ongmougkolkul *et al.,* 2002) ผู้วิจัยจึงนำมาพิจารณาเพื่อแบ่งประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้นจากวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนในการศึกษาครั้งนี้

1.2.6 ประเภทของผลกระทบสิ่งแวดล้อม

สำหรับการประเมินผลกระทบในครั้งนี้ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการแปลงข้อมูลต่างๆ ให้อยู่ในรูปค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยมลสารต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมการผลิตเยื่อ และกระดาษมีผลต่อการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม 5 ประเภท คือ โลกร้อน ฝนกรด ยูโทรฟิเคชั่น หมอกควันพิษ และความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Heijungs *et al.,* 1992; Gonzalez and Zaror, 2000; Schnell *et al.,* 2000; Ali and Sreekrishnan, 2001 and Bordado and Gomes, 2002) ดังนี้

1.2.6.1 Global Warming

ก๊าซเรือนกระจกเป็นสาเหตุหลักของการเกิดปัญหาโลกร้อน (Global Warming) ส่งผลให้การแผ่รังสีต่างๆ มายังพื้นผิวโลกมีความรุนแรงมากขึ้น จากการดูดซับรังสีอินฟราเรดในชั้นบรรยากาศโดยก๊าซเรือนกระจก คือ CO_2 CH_4 และ N_2O ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ชีวมวล น้ำมันเตา ของเหลวดำ ในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเยื่อ และกระดาษ เป็นต้น นอกจากนี้ วิธีการกำจัดกระดาษ (การฝังกลบ เผา และเทกองกลางแจ้ง) ก็มีส่วนในการก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเช่นกัน

1.2.6.2 Acidification

กระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ เป็นแหล่งสำคัญที่ก่อให้เกิดสารประกอบกรดเนื่องจากกรรมวิธีต่างๆ ในการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการนำกลับคืนสารเคมีที่มีสารเคมีพวกโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) และการเผาไหม้น้ำมันเตา ซึ่งมีส่วนในการก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสาร NO_x SO_2 และ TRS ออกสู่บรรยากาศเมื่อฝนตกทำให้เกิดกรดซัลฟูริก และไนตริก มีฤทธิ์ทำลาย กัดกร่อนพืชผลทางการเกษตร แหล่งน้ำ และผู้คนที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้ ขั้นตอนการใช้ปุ๋ยเพื่อการเพาะ และปลูกยูคาลิปตัส การเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานผลิตเยื่อ และกระดาษก็เป็นอีกแหล่งที่ก่อให้เกิดก๊าซ NO_x และ SO_2 ออกสู่สิ่งแวดล้อม (Jawjit *et al.,* 2006)

1.2.6.3 Eutrophication

มลภาวะทางน้ำซึ่งทำให้สภาวะของระบบนิเวศทางน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเข้มข้นของแร่ธาตุ และสารอาหารที่ละลายอยู่ในน้ำมากเกินไป โดยเฉพาะ ฟอสเฟต และไนเตรท จากการศึกษาขั้นตอนการใช้ปุ๋ย ขั้นตอนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ (การต้มเยื่อ การล้างเยื่อ และการฟอกเยื่อ) และขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียมีส่วนในการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ไนเตรท และCOD เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีผลต่อการเกิดผลกระทบ

Eutrophication และแม้ว่า Eutrophication สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ แต่การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารเป็นจำนวนมากจากกิจกรรมในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็วทำให้พืชที่อยู่ใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสง และปลดปล่อยออกซิเจนแก่สิ่งมีชีวิตในน้ำได้ ทำให้สัตว์ และสิ่งมีชีวิตในน้ำตาย เมื่อเพิ่มจำนวนมากขึ้นก็เกิดการทับถมกันระยะเวลานานๆ จึงส่งผลต่อการตื้นเขินของแหล่งน้ำในที่สุด (นรรัตน์ รอดประเสริฐ, 2548)

1.2.6.4 Smog

สภาวะหมอกพิษชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่สภาพอากาศมีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ และไฮโดรเจนคาร์บอนสูง ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ (เก็บเกี่ยว และขนส่งไม้ยูคาลิปตัส) การเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยความร้อนสูงในระหว่างกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน รวมถึงวิธีการกำจัดกระดาษ (การฝังกลบ เผา และเทกองกลางแจ้ง) ก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสารพวก NMVOC CO CH_4 และ NO_x โดยเฉพาะ NO_x และ NMVOC ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมาก ในขณะที่สภาพอากาศมีแสงอาทิตย์เป็นตัวการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ NO_x เกิดปฏิกิริยากับโอโซนก่อให้เกิดสารทุติยภูมิตัวอื่นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ และนัยน์ตา เป็นสาเหตุของการเกิดอาการไอ โรคหอบหืด และโรคปอดตามมา (คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิต และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ, 2549)

1.2.6.5 Human Toxicity

สารประกอบคลอรีนเป็นสารสำคัญชนิดหนึ่งที่ก่อให้เกิดผลกระทบความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ จากขั้นตอนการฟอกเยื่อกระดาษซึ่งมีมลสาร AOX (Absorbable Organic Halides) เป็นมลสารตัวสำคัญซึ่งสลายตัวยาก เกิดสารไดออกซินเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์ และสัตว์ ซึ่งไม่สูญสลายไปได้ง่ายๆ ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตาย สำหรับมนุษย์สารไดออกซินเป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ส่งผลต่อระบบการสืบพันธ์ พัฒนาการทางเพศ และมีผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย (ก่อพงศ์ และสมชาย, 2551) นอกจากนี้มลสาร TRS NO_x SO_2 และฝุ่นละอองจากกิจกรรการเผาไหม้เชื้อเพลิง การจัดการหลังหมดอายุการใช้งานก็เป็นส่วนหนึ่งที่ปลดปล่อยมลสาร และก่อให้เกิดผลกระทบ Human Toxicity ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน โดยจากการศึกษาของ Jawjit *et al.* (2006) พบว่า การนำทางเลือกมาใช้เพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากวัฏจักรชีวิตเยื่อยูคาลิปตัสที่ผลิตด้วยกระบวนการคราฟท์ ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็นระบบย่อย 2 ระบบ คือ ระบบป่ายูคาลิปตัส และระบบการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ พบว่า ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากระบบการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์มากที่สุด ซึ่งเมื่อศึกษาทางเลือกเพื่อนำมาใช้ลดการเกิดมลพิษต่างๆ ทางเลือกหนึ่ง คือ ทางเลือกสำหรับ

การฟอกเยื่อ โดยนำวิธีการฟอกเยื่อแบบหลีกเลี่ยงการใช้ก๊าซคลอรีน (Elemental Chlorine Free: ECF) มาใช้ ส่งผลให้มลสาร AOX ลดลง และผลกระทบ Human Toxicity ลดลง

1.2.7 อุตสาหกรรมเยื่อ และกระดาษในประเทศไทย

อุตสาหกรรมเยื่อ และกระดาษของไทยเริ่มต้นขึ้นในปี พ.ศ. 2466 จากการก่อตั้งโรงงานผลิตกระดาษแห่งแรก คือ โรงงานกระดาษสามเสน ของกรมแผนที่ทหารบก กระทรวงกลาโหม โดยใช้เศษกระดาษเป็นวัตถุดิบ ซึ่งผลิตกระดาษได้วันละ ต่อมารัฐบาลได้ก่อตั้งโรงงานกระดาษกาญจนบุรีในปี พ.ศ. 2478 ซึ่งโรงงานนี้ใช้ไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบทำการผลิตทั้งเยื่อ และกระดาษพิมพ์เขียน กำลังการผลิต 10 ตันต่อวัน ต่อมาได้โอนกิจการโรงงานทั้งสองมาขึ้นกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อมีการจัดตั้งกระทรวงอุตสาหกรรมขึ้นในปี พ.ศ. 2485 (DIW, 1999)

ภายหลังจากนั้นจึงได้มีการจัดตั้งโรงงานกระดาบางประอินในปี พ.ศ. 2488 โดยใช้ฟางข้าวและหญ้าขจรเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ มีกำลังการผลิตประมาณปีละ 9,000 ตัน และผลิตกระดาษพิมพ์เขียนได้ประมาณปีละ 12,000 ตัน สำหรับภาคเอกชนได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในช่วงปี พ.ศ.2490 เป็นต้นมา โดยรัฐบาลได้เริ่มให้มีการส่งเสริมการลงทุนแก่อุตสาหกรรมเยื่อ และกระดาษตั้งแต่ปี พ.ศ. 2505 โดยโรงงานที่ตั้งขึ้นในระยะแรกเป็นการผลิตกระดาษประเภทต่างๆ ส่วนการผลิตเยื่อกระดาษเพิ่งเริ่มอย่างจริงจังในปลายปี พ.ศ. 2525 ซึ่งผลิตเยื่อใยสั้นเท่านั้น ทำให้ประเทศไทยสามารถส่งออกเยื่อกระดาษบางส่วนไปจำหน่ายต่างประเทศได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะการนำเข้าเยื่อใยยาวที่ไม่สามรถผลิตได้ในประเทศไทย โดยแหล่งนำเข้าเยื่อกระดาษที่สำคัญ ได้แก่ แคนาดา สหรัฐอเมริกา นิวซีแลนด์ ชิลี ส่วนเยื่อกระดาษที่ส่งออกนั้นเป็นเยื่อใยสั้น โดยแหล่งส่งออกที่สำคัญ คือ เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น และกลุ่มสหภาพยุโรป (DIW, 1999)

1.2.7.1 กระดาษพิมพ์เขียน

กระดาษ เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นมาสำหรับการจดบันทึก ดังภาพประกอบที่ 1-4 มีประวัติศาสตร์ยาวนาน เชื่อกันว่ามีการใช้กระดาษครั้งแรกๆ โดยชาวอียิปต์โบราณ และชาวจีนตั้งแต่สมัยโบราณ แต่กระดาษในยุคแรกๆ ล้วนผลิตขึ้นเพื่อการจดบันทึก จึงกล่าวได้ว่าระบบการเขียน คือ แรงผลักดัน ให้เกิดการผลิตกระดาษขึ้นในโลก ปัจจุบันกระดาษไม่ได้มีประโยชน์ในการใช้จดบันทึกตัวหนังสือ หรือข้อความเท่านั้น แต่ยังใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้มากมาย เช่น กระดาษชำระ กระดาษห่อของขวัญ กระดาษลูกฟูกสำหรับทำกล่อง เป็นต้น (สารานุกรมเสรี, 2551) หรือแผ่นวัสดุซึ่งได้จากการนำวัสดุหลายชนิดมาผสมกันอย่างเหมาะสม แล้วนำไปทำเป็นแผ่น วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมเหล่านี้ ได้แก่ เยื่อใยสั้น เยื่อใยยาว และสารเคมี วัสดุที่ใช้ผสมเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 2

ส่วน คือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ ได้แก่ ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous Material) ซึ่งเป็นโครงสร้างของแผ่นกระดาษ และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่เติมลงไปผสมกับส่วนของเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน (Advance Agro Public Co., Ltd., 2551) โดยปัจจุบันประเทศไทยมีกำลังการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนอยู่ที่ 1,000,000 ตัน/ปี จากผู้ประกอบการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนประมาณ 13 รายในประเทศไทย ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการในประเทศ (สมาคมการพิมพ์ไทย, 2551)

ภาพประกอบที่ 1-4 กระดาษพิมพ์เขียน

1) องค์ประกอบของกระดาษ

กระดาษโดยทั่วไปจะมีส่วนเส้นใยผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 70-95 ของน้ำหนักกระดาษ ปริมาณส่วนของเส้นใยจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ต้องการผลิต เส้นใยได้จากพืชชนิดต่างๆ เช่น ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง และพืชล้มลุก ส่วนเส้นใยหรือที่เรียกทั่วไปว่า เยื่อ คือ ส่วนที่ใช้ทำกระดาษส่วนมากจะเป็นเยื่อผสมระหว่างเยื่อใยยาว และเยื่อใยสั้น (Advance Agro Public Co., Ltd., 2551)

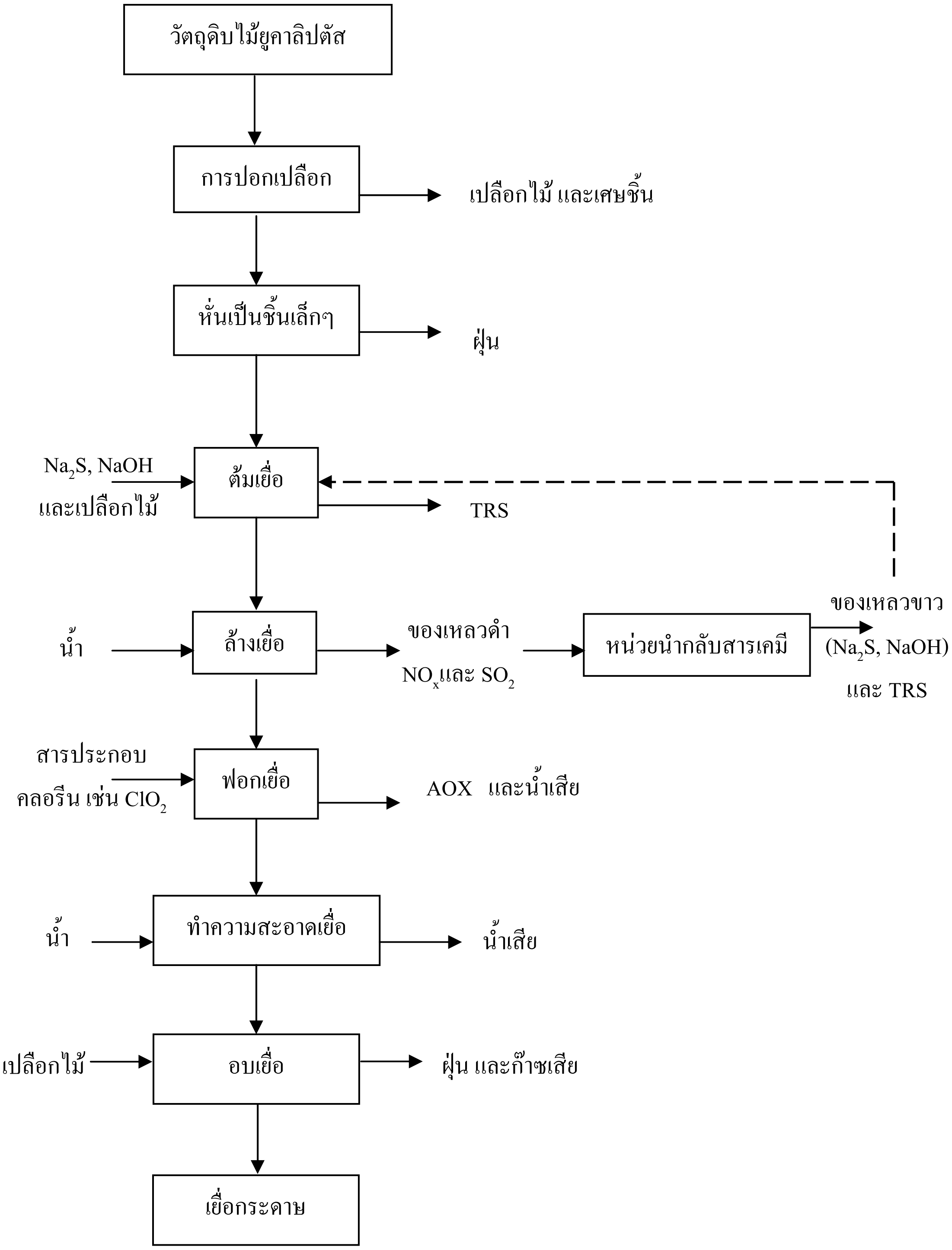
1. เยื่อใยยาวได้จากไม้เนื้ออ่อน (Softwood) ซึ่งเป็นไม้ที่ขึ้นบริเวณที่สูงอากาศเย็น โตช้า ใบมีลักษณะแคบเรียวยาว (Needle) เส้นใยมีลักษณะหยาบ มีความแข็งแรงสูง มีความยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 20-40 ไมครอน (1 ไมครอนเท่ากับ 0.001 มิลลิเมตร) ไม้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไม้สน (Pine) และ สปรู๊ซ (Spruce) เป็นต้น (กรมโรงงาน, 2551) สำหรับประเทศไทยไม่มีแหล่งวัตถุดิบประเภทไม้เนื้ออ่อน เนื่องจากภูมิประเทศไม่เอื้ออำนวย จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

2. เยื่อใยสั้นได้จากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ซึ่งเป็นไม้ที่ขึ้นในบริเวณเขตร้อน โตเร็ว ใบมีลักษณะกว้าง เส้นใยมีลักษณะเล็ก ละเอียด ความแข็งแรงต่ำ มีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 10-20 ไมครอน แสดงดังภาพประกอบที่ 1-5 ไม้ในกลุ่มนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัส กระถินเทพา เบิร์ช และแอสเพน เป็นต้น มีการผลิตเยื่อภายในประเทศประมาณร้อยละ 30 จากผู้ผลิต 6 ราย และมีบางส่วนที่ถูกนำเข้าในรูปของ Recycled Paper เพื่อนำมาตีเป็นเยื่อ และใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ (Jawjit *et al.,* 2006) การปลูกป่าไม้ยูคาลิปตัสมีมากในบริเวณภาคตะวันออก และทางตอนใต้ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษชนิดเยื่อใยสั้น เยื่อกระดาษส่วนใหญ่ในประเทศไทยถูกผลิตมาจากต้นยูคาลิปตัส ประมาณร้อยละ 80 (กรมโรงงาน, 2551)

ภาพประกอบที่ 1-5 เยื่อยูคาลิปตัสฟอกขาว
ที่มา : Fancy Paper Co., Ltd. (2002)

1.2.7.2 การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์

ขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์จากยูคาลิปตัส แสดงดังภาพประกอบที่ 1-6 การผลิตแบบคราฟท์ต้องการพลังงาน และเชื้อเพลิงจำนวนมาก (Lopes *et al.,* 2003) แต่ในขณะเดียวกันภายใต้กระบวนการผลิตก็สามารถผลิตพลังงานไอน้ำได้ โดยไอน้ำประมาณร้อยละ 50 สามารถนำกลับได้จากหน่วยการนำกลับสารเคมี และเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้ได้ ส่วนหนึ่งได้จากเปลือกไม้ที่เป็นเศษเหลือจากขั้นตอนการปอกเปลือกซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (EC, 2001) นอกจากนี้ขั้นตอนการต้มเยื่อ และฟอกเยื่อกระดาษ ยังก่อให้เกิดมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยในการต้มเยื่อต้องมีการเติมสารเพื่อย่อยลิกนินที่อยู่ในเนื้อไม้ออกก่อน เพื่อคุณภาพของเยื่อ สารดังกล่าว คือ โซเดียมซัลไฟล์ (Na_2S) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารทั้งสองตัวก่อให้เกิดมลพิษ เช่น SO_2 NO_x TRS (Total Reduced Sulfur) และของเหลวดำ (Black Liquor) เนื่องจากมีองค์ประกอบต่างๆ ที่สกัดได้จากเยื่อไม้ปนเปื้อนอยู่ โดยส่วนใหญ่มักเป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่น ลิกนิน เป็นต้น (ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์ และภานุพงศ์ สถิตวัฒนาพร, 2547) ของเหลวดังกล่าวจึงมีสีดำและถูกนำเข้าสู่หน่วยนำสารเคมีกลับคืนเพื่อนำ Na_2S และ NaOH กลับมาใช้ในกระบวนการต้มอีกครั้ง มลพิษต่างๆที่ถูกปล่อยออกมาก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น Acidification Eutrophication และ Global Warming ส่วน Total Reduced Sulfur: TRS เป็นสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นออกสู่สิ่งแวดล้อม ขั้นตอนต่อจากการต้มเยื่อ คือ ขั้นตอนการฟอก สารที่ถูกนำมาใช้ในการฟอก คือ สารประกอบคลอรีน เนื่องจากมีราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการฟอกแต่ก่อให้เกิดกมลพิษ โดยเฉพาะพวก AOX เป็นสารสลายตัวยาก เมื่อออกสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดสารไดออกซินที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะมลภาวะทางน้ำที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และเกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Jawjit *et al.,* 2006)



ภาพประกอบที่ 1-6 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft Pulp Process)

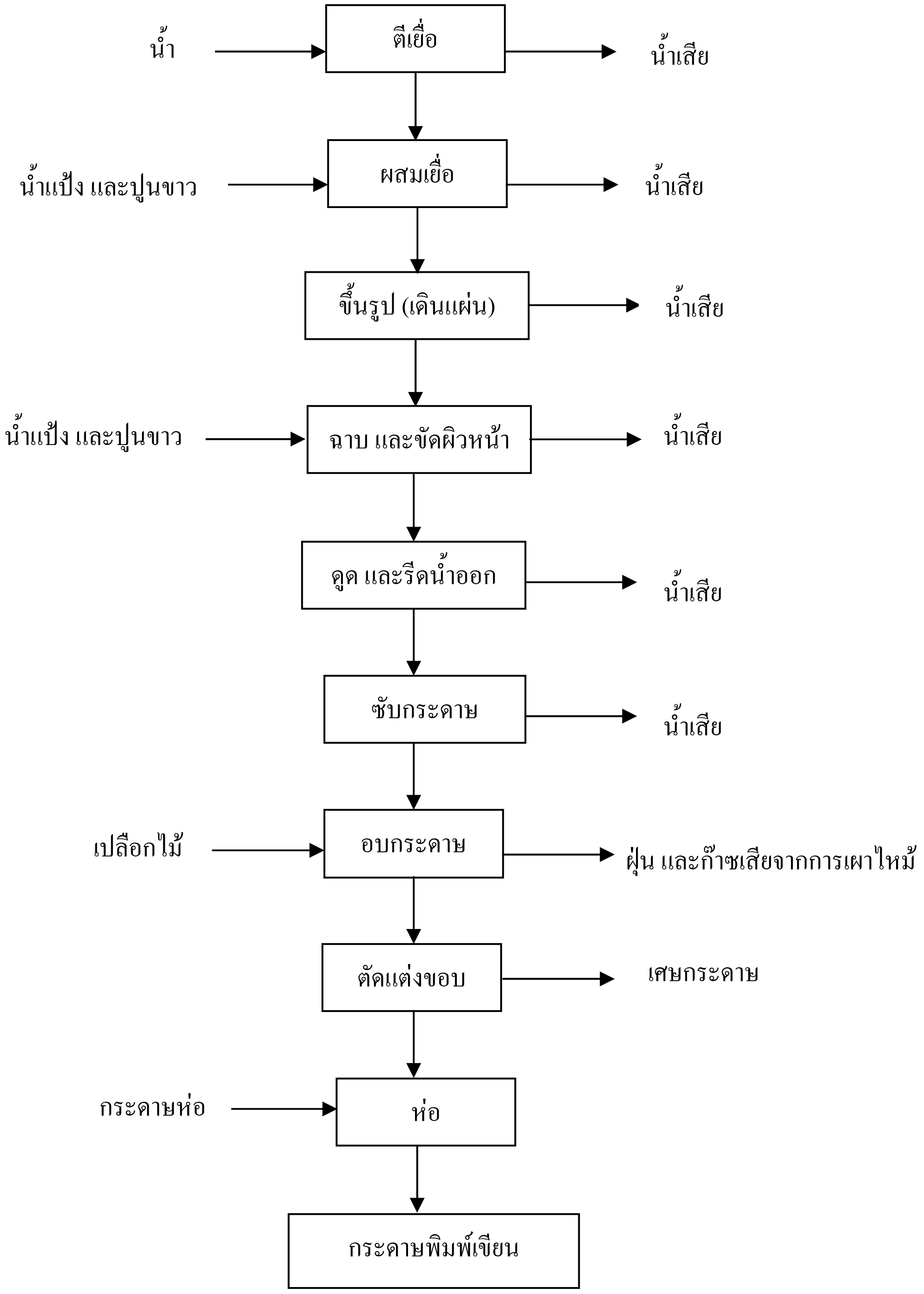
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ongmongkoklkul *et al*. (2001)

1.2.7.3) กระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน

ขั้นตอนแรกของการผลิต คือ เยื่อใยสั้น และเยื่อใยยาวจะถูกนำมาตีรวมกันเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน และมีความละเอียด ซึ่งต้องอาศัยน้ำเป็นตัวช่วยในการตีเยื่อ ต่อจากนั้นจะผ่านเข้าสู่กระบวนการผสมเยื่อในที่นี้ จะมีการเติมสารเคมี เพื่อให้เยื่อจับตัวกันดีมากขึ้น ขั้นตอนต่อมาเข้าสู่ขั้นตอนการขึ้นรูป เพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษ ผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการรีดน้ำออก ก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก ต่อมาเป็นขั้นตอนการอบแห้ง โดยใช้พลังงานไอน้ำเป็นตัวอบแผ่นกระดาษที่เลื่อนผ่านห้องอบไปตามสายพาน ไอน้ำดังกล่าว ใช้เชื้อเพลิงมวลชีวภาพที่ได้จากเปลือกไม้ (กรณีที่โรงงานผลิตเยื่อ และกระดาษ) จึงก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศออกสู่สิ่งแวดล้อมหลากหลายชนิด เช่น CO_2 CH_4 NO_x CO และVOC มลพิษต่างๆ เหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม เช่น Global Warming, Acidification และ Smog กระดาษที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการขัดผิวหน้า และเคลือบผิวหน้ากระดาษ เพื่อให้ผิวหน้ากระดาษมีความเรียบ ลื่น และเป็นมันวาว ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งาน เมื่อขัดผิวหน้ากระดาษแล้ว กระดาษส่วนหนึ่งก็จะเข้าม้วนเป็นม้วนใหญ่ ดังภาพประกอบที่ 1-7 อีกส่วนก็จะถูกตัดขอบ และตัดเป็นแผ่นก่อนนำไปห่อและส่งกระจายสินค้าแก่บริโภคต่อไป ขั้นตอนการตัดก่อให้เกิดเศษกระดาษจำนวนมาก เศษกระดาษดังกล่าวโรงงานจะนำกลับเข้าสู่ขั้นตอนการตีให้กลายเป็นเยื่อ และนำไปผลิตเป็นกระดาษต่อไป ดังภาพประกอบที่ 1-8

ภาพประกอบที่ 1-7 กระดาษม้วนใหญ่ (Jumbo Roll)

ที่มา : Fancy Paper Co., Ltd. (2002)



ภาพประกอบที่ 1-8 กระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Printing and Writing Paper Process)
ที่มา : ดัดแปลงจาก ประเสริฐ และคณะ (2547)

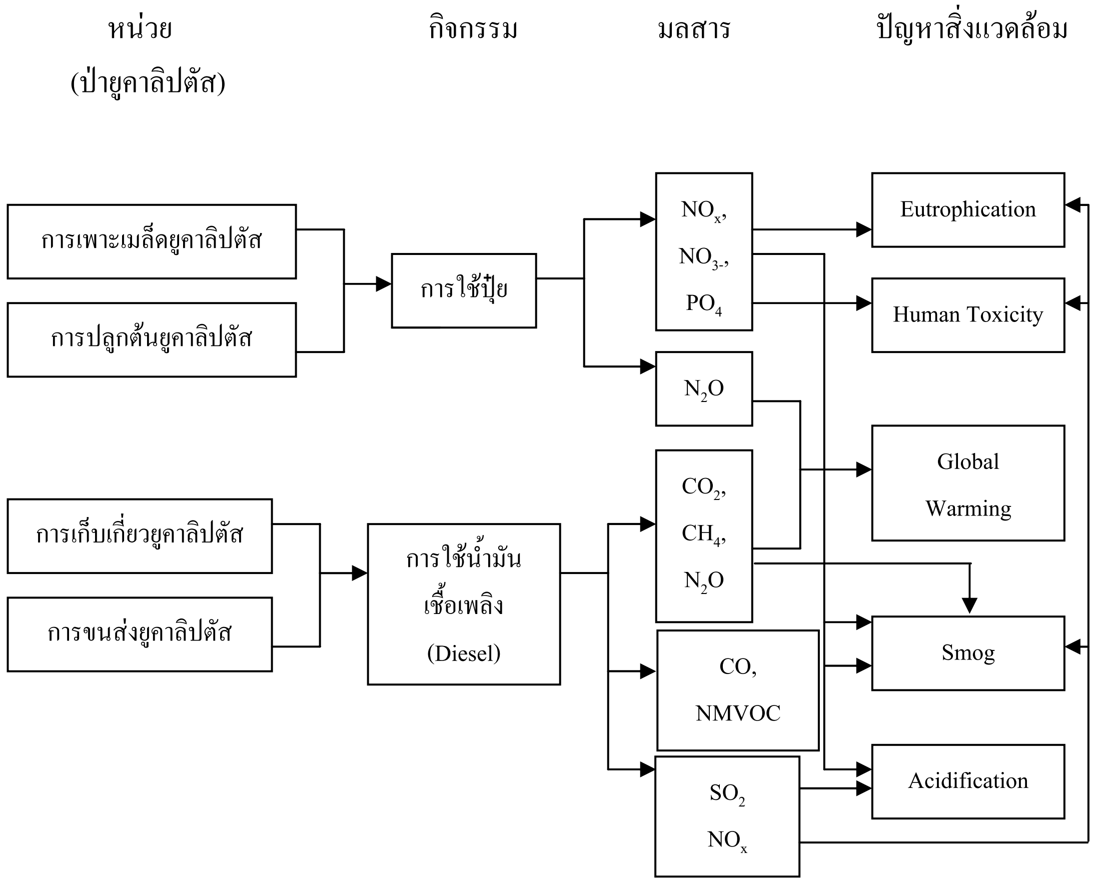
1.2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.8.1 การนำ LCA มาใช้กับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

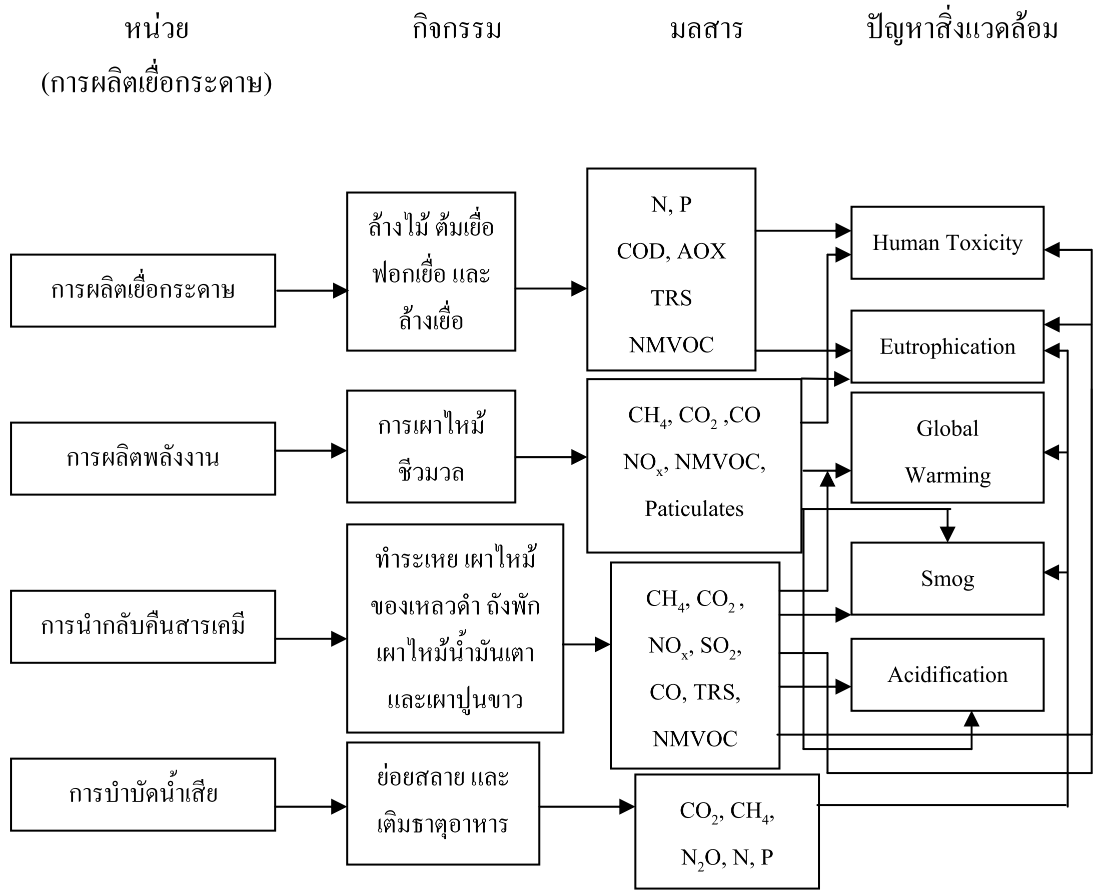
Jawjit *et al.* (2006) ใช้ LCA ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตเยื่อกระดาษในประเทศไทย โดยแยกระบบย่อยในการศึกษาออกเป็น 2 ระบบย่อย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-9 และ 1-10 และจากการประเมินพบว่า ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ Eutrophication และ Acidification ซึ่งสาเหตุการเกิดมลพิษที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวมาจากหน่วยการฟอกเยื่อ และหน่วยการนำกลับสารเคมีเป็นหลัก สำหรับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมประเภทอื่นๆ คือ Global Warming, Smog และ Toxicity เมื่อเทียบกับปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดยังถือว่าเกิดขึ้นเป็นส่วนน้อย ซึ่งสอดคล้องกับ Sara *et al.* (2009) ที่กล่าวว่ากระบวนการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานมากที่สุด และก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวมทั้งหมดสูงถึงร้อยละ 50 ส่วนผลกระทบ Eutrophication โดยส่วนใหญ่มีสาเหตุหลักมาจากระบบย่อยการปลูกยูคาลิปตัส และหน่วยการบำบัดน้ำเสียของระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 50 ของการเกิดผลกระทบดังกล่าว ในขณะที่ Joelsson and Gustavsson (2008) กล่าวว่า อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษต้องการเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นจำนวนมากเพื่อนำมาผลิตพลังงาน แม้กระทั่งเศษไม้ที่หลงเหลือก็ถูกเก็บรวบรวม และนำมาใช้เพื่อการผลิตพลังงานอย่างถี่ถ้วน เพราะการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ สามารถลดการใช้น้ำมันได้ จึงเป็นผลให้ลดการเกิดสภาวะโลกร้อนได้ตามมา อีกทั้งการลดการใช้น้ำเพื่อการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการคราฟท์ก็สามารถช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ลดลงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ และอุณหภูมิของความร้อนได้ และความร้อนส่วนเกินที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการทำระเหย เป็นผลให้ลดการใช้ไอน้ำเพื่อการผลิตพลังงานลงได้ (Ulrika1 *et al.,* 2005) แต่สำหรับงานของ Sara *et al.* (2009) ได้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตการผลิตเยื่อโดยแบ่งออกเป็น 6 หน่วย คือ การผลิตวัตถุดิบ (ปอ และป่าน) การผลิตสารเคมี การผลิตไฟฟ้า การขนส่ง การผลิตเยื่อ และการบำบัดของเสีย ซึ่งผลการประเมิน พบว่าการผลิตสารเคมี การผลิตไฟฟ้า การผลิตวัตถุดิบ เป็นสาเหตุหลักในการก่อให้เกิดผลกระทบ โดยก่อให้เกิดผลกระทบโลกร้อน (Global Warming) ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) และการลดลงของชั้นโอโซน (Ozone Layer Depletion) ตามลำดับ

ระบบย่อยป่ายูคาลิปตัส (Eucalyptus Forestry Sub-System) ระบบย่อยดังกล่าวนี้รวมกิจกรรมต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การเพาะเมล็ดยูคาลิปตัส ที่มีกิจกรรมการใส่ปุ๋ยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยก่อให้เกิดมลพิษพวก NO_x NO และ PO_4 ซึ่งส่งผลก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม คือ ปัญหายูโทรฟิเคชั่น Eutrophication นอกจากนี้ยังมีสารพวก N_2O ที่มีผลต่อการเกิดปัญหาโลกร้อน (Global Warming) และกิจกรรมการขนส่งไม้โดยใช้รถบรรทุก ก็เป็นอีกกิจกรรมที่มีผลต่อการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น โลกร้อน ที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากงานวิจัยของ Sara *et al.* (2009) พบว่าการขนส่งไม้เข้าสู่โรงงานเพื่อผลิตเยื่อกระดาษโดยการใช้รถไฟจะก่อให้เกิดผลกระทบน้อยกว่าการขนส่งด้วยรถบรรทุก หรือการใช้เรือบรรทุก ซึ่งการขนส่งในที่นี้รถไฟ อาจใช้เชื้อเพลิง (น้ำมันดีเซล หรือไฟฟ้า) ก็สามารถลดการเกิดผลกระทบได้มากกว่ารถบรรทุกทั้งสิ้น

ระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft Pulp Production Sub-System) ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษสารประกอบคลอรีนถูกนำมาใช้เพื่อการฟอกเยื่อจึงก่อให้เกิดสารพวก AOX (Absorbable Organic Halides) ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายยาก ก่อให้เกิดสารไดออกซินที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เกิดเป็นปัญหามลภาวะโดยเฉพาะทางน้ำ และส่งผลต่อสุขภาพความเป็นอยู่ของมนุษย์ (Toxicity) นอกจากการฟอกเยื่อกระดาษแล้ว กระบวนการนำกลับสารเคมี (Chemical Recovery) ยังเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดมลพิษที่สำคัญหลายชนิด คือ CH_4 CO_2 NO_x SO_2 CO NMVOC และ TRS (Total Reduced Sulfur) ก่อให้เกิดปัญหา Global Warming Acidification และ Smog นอกจากนี้ Sara *et al.* (2009) ยังกล่าวไว้อีกว่าหน่วยการนำกลับคืนสารเคมี โดยมีกิจกรรมจากหม้อต้มนำกลับคืนสารเคมี กิจกรรมการเผาปูนขาว และกิจกรรมการต้มเยื่อ เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบ ซึ่งควรมีการแก้ไข และปรับปรุงกิจกรรมดังกล่าวเพื่อลดการก่อมลพิษที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม



ภาพประกอบที่ 1-9 ระบบย่อยยูคาลิปตัส (Eucalyptus Forestry Sub-System)
ที่มา : Jawjit *et al.* (2006)



ภาพประกอบที่ 1-10 ระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft Pulp Production Sub-System)
ที่มา : Jawjit *et al.* (2006)

1.2.8.2 การนำ LCA มาใช้กับอุตสาหกรรมกระดาษ

การเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์เขียนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความต้องการวัตถุดิบพื้นฐานต่างๆ มากขึ้น เช่น เยื่อกระดาษ น้ำ ไฟฟ้า เชื้อเพลิง รวมถึงสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต ผลที่ตามมา คือ ของเสีย และมลพิษต่างๆ ที่มิอาจหลีกเลี่ยงได้ หากทางโรงงานไม่มีการจัดการที่ดี ของเสียที่เกิดขึ้นต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นตามกาลเวลา ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เด่นชัดที่สุดในขณะนี้ คือ ปัญหาโลกร้อน (Global Warming) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดี ก๊าซที่ก่อให้เกิดปัญหา คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังนั้น ปัญหาสิ่งแวดล้อมอาจไม่เกิดขึ้น หรือลดน้อยลง หากโรงงานให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อม และมีการบริหารจัดการที่ดี และเครื่องมือชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการที่ดีแก่โรงงาน คือ LCA

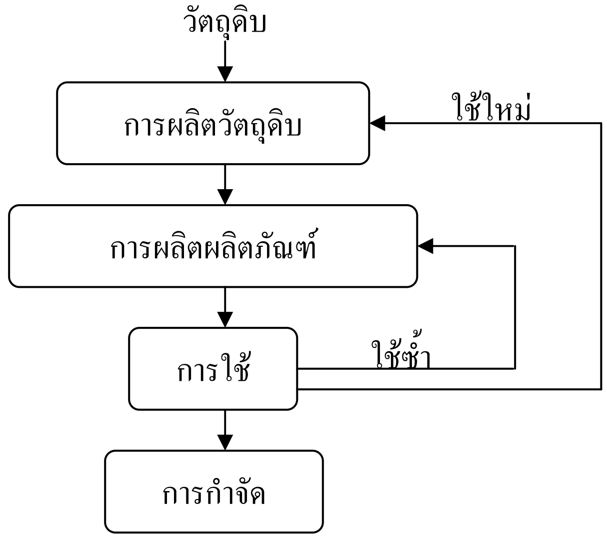
LCA ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น และอุตสาหกรรมกระดาษก็เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่ง ซึ่งนำ LCA มาใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษจำเป็นต้องอาศัยน้ำ และเชื้อเพลิงจำนวนมากเพื่อการผลิต จากรายงานการวิจัยของ Lopes *et al.* (2006) พบว่าการนำเชื้อเพลิงจำพวก Natural Gas มาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงน้ำมันดิบ (Heavy Fuel Oil) ในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนสามารถลดการเกิดมลพิษทางอากาศโดยรวมได้ร้อยละ 50 ซึ่งหมายถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมที่โรงงานสามารถควบคุมให้เกิดน้อยลงได้ มิเพียงแต่มลพิษทางอากาศเท่านั้นที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ ของเสียในรูปของ ของแข็ง ของเหลวก็เช่นกัน โดยเฉพาะเศษกระดาษจำนวนมากที่มีผลก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาของ Ana *et al.* (2007) พบว่าขั้นตอนหนึ่งจากการประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมาก คือ การกำจัดขั้นสุดท้าย (ฝังกลบ) ซึ่งเกิดจากกระดาษเสียต่างๆ และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Ongmongkoklkul *et al.* (2001) ที่พบว่าขั้นตอนการกำจัดขั้นสุดท้ายก่อให้เกิดผลกระทบกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม คือ โลกร้อน เนื่องจากร้อยละ 60 ของกล่องกระดาษถูกกำจัดโดยการฝังกลบ จากความหลากหลายของของเสียที่เกิดขึ้นหากโรงงานสามารถลดของเสียที่เกิดขึ้นต่างๆ ได้ ย่อมส่งผลให้ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมลดน้อยลง และการนำของเสียไปใช้ประโยชน์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ จากงานวิจัยของ Pickin (2000) พบว่าการนำของเสียกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่เป็นทางเลือกหนึ่ง ของการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นโดยใช้ LCA เป็นเครื่องมือในการประเมิน เช่น การเปลี่ยนของเสียให้อยู่ในรูปของพลังงาน ซึ่งผลที่ตามมา คือ ลดการเกิดมลพิษต่างๆ โดยเฉพาะก๊าซเรือนกระจก คือ CH_4 ซึ่งมีประมาณร้อยละ 57 ของการเกิดก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฝังกลบของเสียที่เป็นกระดาษ ในขณะที่ Hanna *et al.* (2008) ได้นำ LCA มาใช้เพื่อจัดการกับกระดาษเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตได้กล่าวว่าการจัดการโดยการนำกระดาษเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซึ่งผลิตจากเยื่อใหม่ กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตก่อให้เกิดผลกระทบน้อยกว่าการนำกระดาษเสียที่เกิดขึ้นไปกำจัดด้วยวิธีการเผา ซึ่งสอดคล้องกับการนำ LCA มาใช้เพื่อการจัดลำดับความสำคัญของการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมกระดาษของ Jannick *et al.* (2007) โดยได้กล่าวไว้ว่า ควรให้ความสำคัญกับการนำของเสียไปใช้ประโยชน์มากกว่าที่จะนำของเสียเหล่านั้นไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบ หรือการเผา ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษตามมาเป็นจำนวนมาก กิจกรรมในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน นอกจากนี้ Francesco *et al.* (2008) ยังได้กล่าวว่าการนำ LCA มาใช้เพื่อประเมินผลกระทบจากการฝังกลบ และการเผา พบว่าการจัดการของเสียด้วยวิธีการฝังกลบเป็นการจัดการที่แย่ที่สุด และกล่าวต่อว่าการจัดการด้วยการฝังกลบหากสามารถนำพลังงานที่เกิดขึ้นกลับไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ได้จะมี

ประสิทธิภาพมาก ซึ่งสามารถผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าใช้ได้หากเป็นระบบการฝังที่ดี ซึ่งรวมถึงการจัดการเก็บรวบรวมก๊าซที่เกิดจากหลุมฝังกลบด้วย

จากการศึกษาพบว่า LCA ถูกนำมาใช้กับอุตสาหกรรมหลายประเภทเพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรมกระดาษก็เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่สามารถนำ LCA มาใช้และทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนมากขึ้น รวมถึงนำไปสู่การศึกษาแนวทาง และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ตรงจุด ซึ่งลดการสูญเสียเวลาที่จะต้องทดลองแก้ไขปัญหาทีละจุดหากใช้เครื่องมือสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นมาประเมิน ซึ่งเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นๆ เช่น Pollution Prevention (PP) Green Technology (GT) Cleaner Production (CP) และ Clean Technology (CT) เหมาะกับการนำมาใช้แก้ไขปัญหา หลังจากใช้ LCA ประเมินสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาที่เกิดขึ้น เนื่องจาก LCA มีหลักการการประเมินที่สามารถประเมินได้ครอบคลุมทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์หรือบริการต่างๆ ในขณะที่เครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นๆ ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้เพียงครั้งละกระบวนการเดียวเท่านั้น กล่าวได้ว่า LCA เป็นเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมที่เหมาะแก่การนำมาใช้ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เพื่อหาสาเหตุของการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมากกว่าเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นๆ แต่จำเป็นต้องอาศัยข้อมูล และเวลาในการศึกษาเป็นจำนวนมาก หากมีเวลาจำกัด ข้อมูลไม่เพียงพอ หรือข้อมูลไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้เพื่อประเมินผลกระทบ อาจทำให้ได้ผลไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งเอาไว้ได้ ดังนั้นการกำหนดเป้าหมาย และขอบเขตของการศึกษาจึงเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการทำ LCA

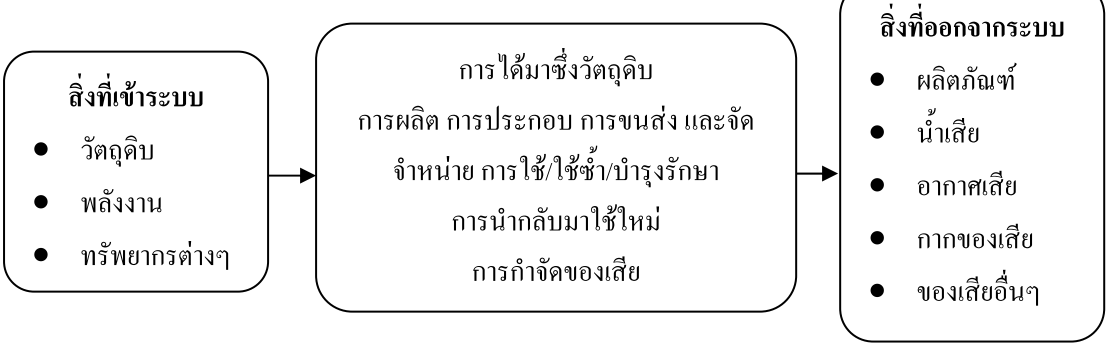
1.2.9 วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

กล่าวได้ว่า วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนโดยทั่วไปเริ่มตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ สารเคมีและเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ต้องนำมาใช้ในกระบวนการผลิต แหล่งที่มาต่างๆ ของทรัพยากร รวมถึงการกระจายสินค้า การขนส่ง การใช้งาน การนำกลับมาใช้ใหม่ และการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน (ประเสริฐ และคณะ, 2548) ซึ่งหากนำผลการประเมินที่ได้มาศึกษาหาทางเลือกเพื่อนำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้น ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นก็สามารถลดลงได้ เนื่องจากผลที่ได้จากการประเมิน คือ สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น นอกจากนี้การพิจารณาข้อมูลเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องภายใต้ขอบเขตระบบ (System Boundary) ที่ศึกษาเพื่อความถูกต้องของข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมิน ดังภาพประกอบที่ 1-11 ก็เป็นอีกวิธีการที่การประเมินโดยใช้ LCA สามารถทำได้



ภาพประกอบที่ 1-11 ตัวอย่าง Simple Flow Sheet ซึ่งสามารถนำมาใช้กับการคัดเลือกข้อมูลได้
ที่มา : ดัดแปลงจาก Henrick (1997)

ขอบเขตระบบ (System Boundary) ของผลิตภัณฑ์ในที่นี้ คือ ขอบเขตระบบของกระดาษพิมพ์เขียน หมายถึงขอบเขตระหว่างผลิตภัณฑ์ และสิ่งแวดล้อม หรือระบบผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยที่ระบบผลิตภัณฑ์ คือ หน่วยที่รวบรวมวัสดุ และพลังงานที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นหน่วยงาน (Unit Process) ต่างๆ ที่ทำหน้าที่อย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างที่สามารถแบ่งกระแสขั้นตอนของทรัพยากรวัตถุดิบ หรือพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่เข้าระบบก่อนถูกเปลี่ยนแปลงในกระบวนการต่างๆ ดังภาพประกอบที่ 1-12



ภาพประกอบที่ 1-12 ขั้นตอน และขอบเขตของ LCA
ที่มา : ดัดแปลงจาก เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล (2544)

ดังนั้นวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนโดยทั่วไปจึงพิจารณา ดังภาพประกอบที่ 1-13 ซึ่งขอบเขตการนำมาพิจารณานั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ประเมินเป็นสำคัญ เนื่องจากข้อจำกัดของการได้มาซึ่งข้อมูลต่างๆ ต้องใช้เวลาเพื่อการเก็บรวบรวมเป็นจำนวนมาก รวมถึงที่มาของข้อมูลต่างๆ ที่นำมาใช้หากได้มาจากแหล่ง หรือสถานที่ที่เกี่ยวข้องโดยตรงผลการประเมินที่ได้ก็น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของกิจกรรม และขั้นตอนต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตในประเทศไทย

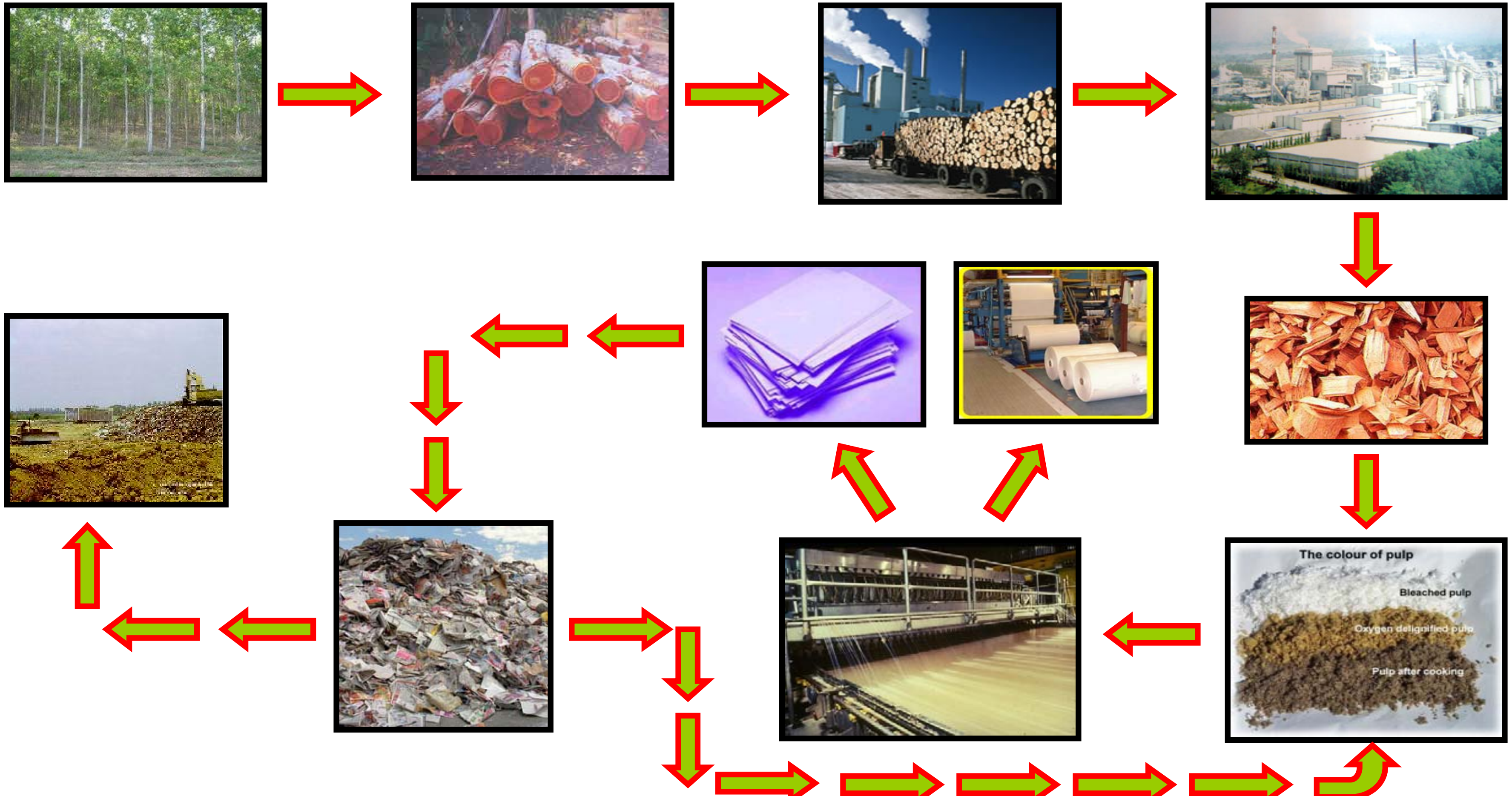
2. ศึกษาทางเลือกเพื่อเป็นแนวทางในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกิจกรรม และขั้นตอนที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

2. ทราบถึงทางเลือกต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมในวัฏจักรชีวิตของกระดาษพิมพ์เขียนได้

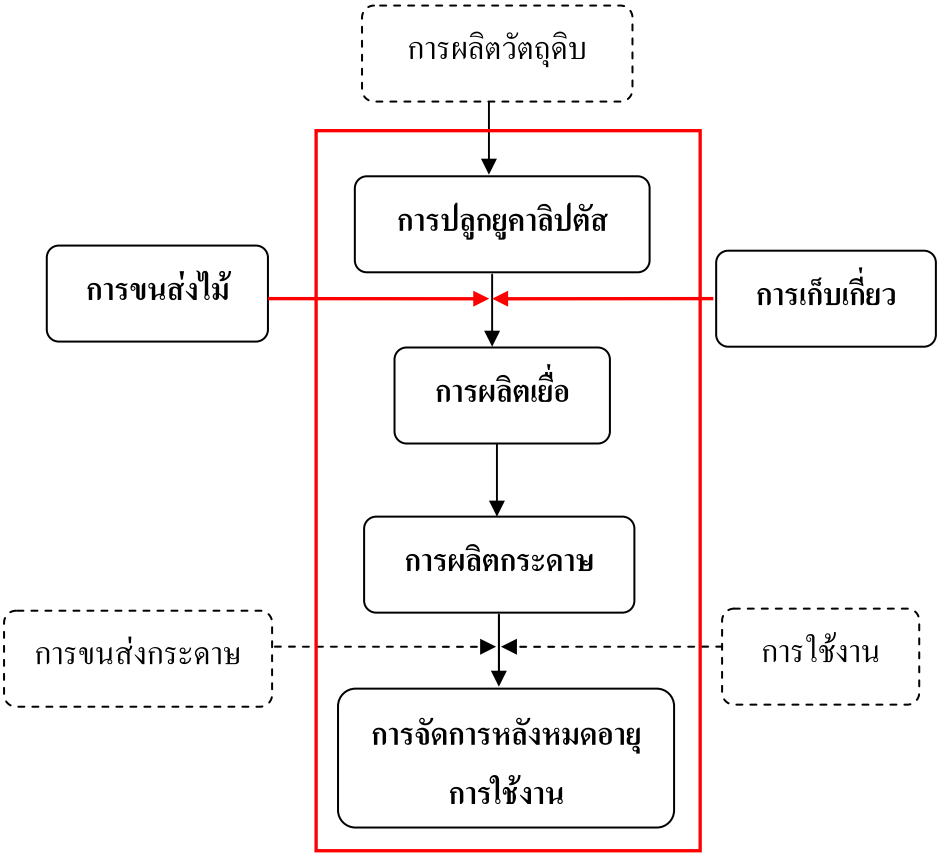
3. สามารถนำแบบจำลองที่ใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนไปใช้ประโยชน์เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามเงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไปได้



ภาพประกอบที่ 1-13 วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตการศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นแบบ Cradle to Grave ดังภาพประกอบที่ 1-14 ซึ่งใช้หน่วยอ้างอิงในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของกระดาษพิมพ์เขียนที่กำลังการผลิต 1,000,000 ตัน/ปี ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมภายใต้ขอบเขตที่กำหนดของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน โดยเยื่อกระดาษที่นำมาผลิตกระดาษพิมพ์เขียนในการศึกษาครั้งนี้ผลิตจากเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ข้อมูลที่นำมาใช้ส่วนใหญ่มาจากการศึกษาจากเอกสาร รวมถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และสอบถามข้อมูลจากโรงงานโดยใช้แบบสอบถาม



หมายเหตุ ข้อความที่ล้อมรอบด้วยเส้นประไม่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้

ภาพประกอบที่ 1-14 ขอบเขตระบบการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนในการศึกษาครั้งนี้

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเชิงวิเคราะห์ ข้อมูลส่วนใหญ่ที่นำมาใช้เก็บรวบรวมจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ เช่น งานวิจัย เอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และใช้แบบสอบถามเพื่อขอข้อมูลจากโรงงาน ดังภาพประกอบที่ 2-1

2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการในการประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ทำการประเมินโดยใช้หลักการ LCA ตามวิธีอนุกรมมาตรฐาน ISO 14000 ร่วมกับแบบจำลองของ Jawjit *et al.* (2006) ซึ่งมีลักษณะการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน (Multi-Criteria Analysis: MCA) คือ ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม รวมถึงปัญหาที่หลากหลายบนพื้นฐานของกฎเกณฑ์ที่มีความซับซ้อน หรือแตกต่างกัน โดยวัตถุประสงค์ของการประเมินแบบผสมผสานใช้เปรียบเทียบ และจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก และประเมินผลลัพธ์ที่ได้อย่างเป็นที่ยอมรับ (Hermann *et al.,* 2007) แบ่งขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

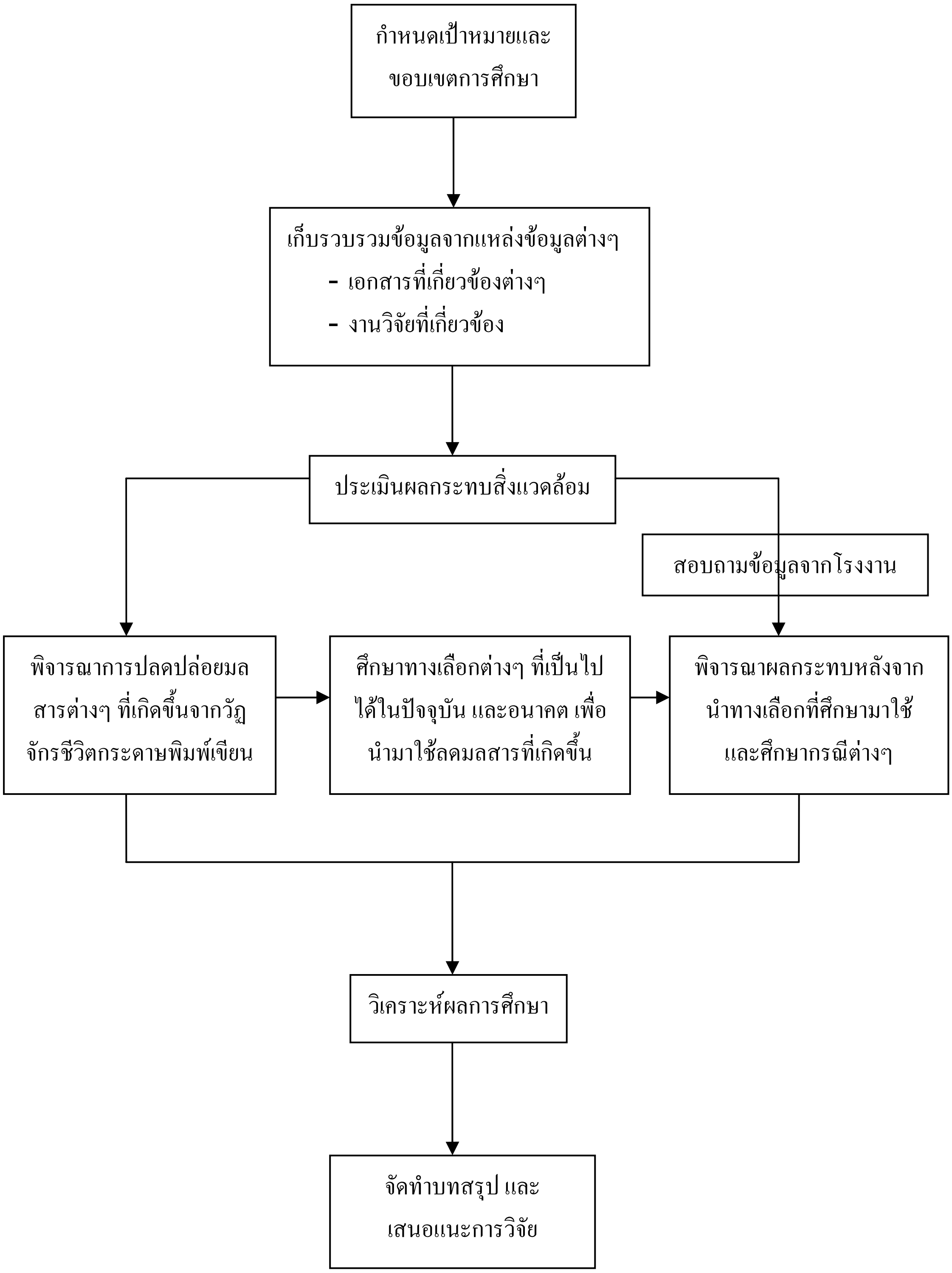
2.1.1 การกำหนดเป้าหมาย และขอบเขตการศึกษา (Goal and Scope Definition)

2.1.1.1 ศึกษาวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

โดยศึกษากระบวนการตลอดวัฏจักรการได้มาซึ่งกระดาษพิมพ์เขียน ที่ผลิตจากเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์

2.1.1.2 การกำหนดวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายในการทำ LCA ของกระดาษพิมพ์เขียน

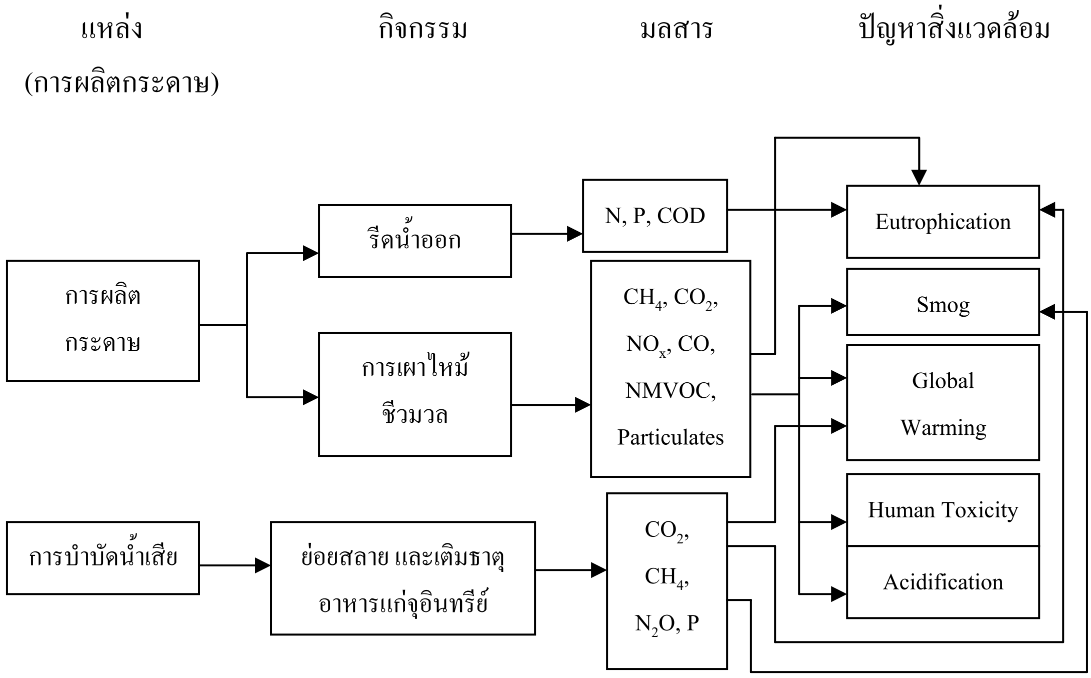
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้ คือ ประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้น ตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน พร้อมทั้งศึกษาทางเลือกที่เหมาะสม และเป็นไปได้ ในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรกระดาษพิมพ์เขียนจากขั้นตอน และกิจกรรมที่กำหนดขึ้น



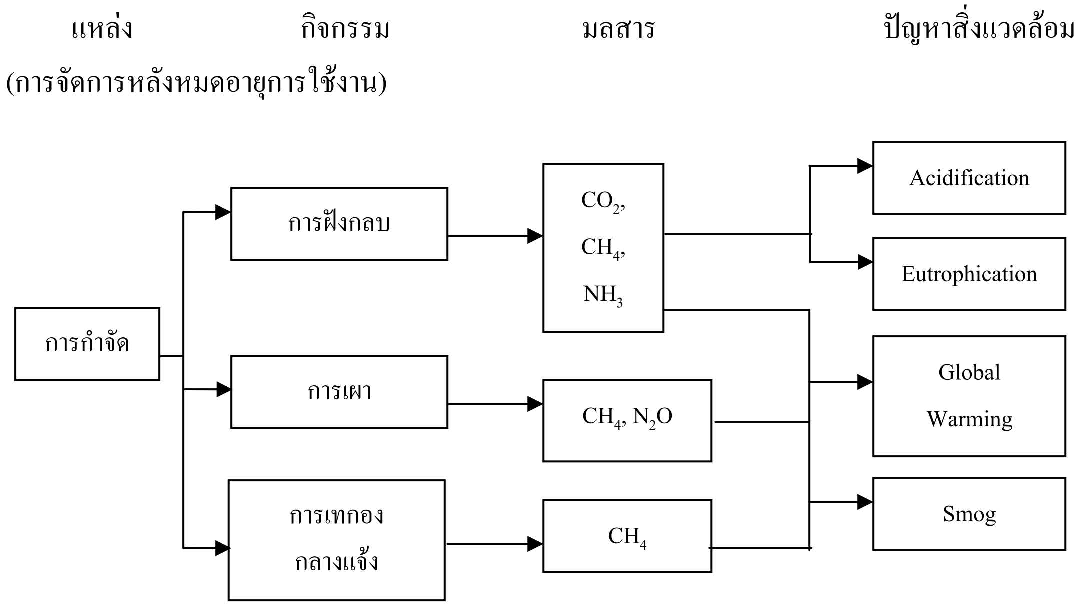
ภาพประกอบที่ 2-1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

2.1.1.3 กำหนดขอบเขตการศึกษา (Scope)

ขอบเขตที่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 4 ระบบย่อย คือ ระบบย่อยการปลูกป่ายูคาลิปตัส ระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน และระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งานของกระดาษพิมพ์เขียน สำหรับระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน และระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน ผู้วิจัยได้วิเคราะห์บัญชีรายการสารขาเข้า และสารขาออกจากกิจกรรม ไว้ดังภาพประกอบที่ 2-2 และ 2-3 การวิจัยครั้งนี้ไม่นำการขนส่ง และการใช้งานของกระดาษพิมพ์เขียนมาพิจารณา เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์กระดาษถูกขนส่งไปยังสถานที่ต่างๆ อย่างหลากหลาย และถูกนำไปใช้งานในหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไป ข้อมูลจึงมีความซับซ้อน ยากต่อการได้มาซึ่งข้อมูลต่างๆ จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในการศึกษาครั้งนี้



ภาพประกอบที่ 2-2 ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Printing Paper Sub-System)



ภาพประกอบที่ 2-3 ระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน (Paper Disposal Sub-System)

2.1.1.4 หน่วยการทำงาน (Functional Unit: FU)

ผู้วิจัยใช้กำลังการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน 1,000,000 ตัน/ปี เป็นหน่วยอ้างอิงเพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนในครั้งนี้

2.1.1.5 การกำหนดเกณฑ์ในการประเมินวัฏจักรชีวิต (Assessment Criteria)

จากการศึกษากระบวนการผลิตเบื้องต้น รวมถึงการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำ LCA มาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษในประเทศไทย เช่น งานวิจัยของ Jawjit *et al.* (2006) และ ประเสริฐ และคณะ (2547) พบว่าประเด็นสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น และมีความสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการศึกษาจากการประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (Heijungs *et al.,* 1992) คือ

1. สภาวะโลกร้อน (Global Warming)

2. สภาวะฝนกรด (Acidification)

3. สภาวะยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication)

4. สภาวะหมอกควันพิษ (Smog) (คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิต และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ, 2549)

5. สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Toxicity)

2.1.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

2.1.2.1 ศึกษาข้อมูลทุติยภูมิ

การศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงฐานข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ และกระดาษพิมพ์เขียนในประเทศไทย เพื่อคำนวณข้อมูลดิบต่างๆ เช่น ปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณเชื้อเพลิง ปริมาณน้ำใช้ ปริมาณกระดาษเสียที่ต้องกำจัด เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2-1 และนำไปใช้ในการคำนวณกับแบบจำลองเพื่อหาค่าการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมที่กำหนด วิธีการคำนวณปริมาณข้อมูลการใช้ทรัพยากรต่างๆ รวมถึงสารเคมี และปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น แสดงไว้ดังภาคผนวก ก ข้อมูลส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในงานวิจัยครั้งนี้จึงมีแหล่งที่มาจากฐานข้อมูลที่หลากหลายส่งผลให้ส่วนของค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ เพื่อลดมลพิษต่างๆ ไม่ถูกนำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้

2.1.3 การวิเคราะห์บัญชีรายการข้อมูล (Life Cycle Inventory Analysis) คำนวณ Emission Score และ Impact Score

2.1.3.1 การจำแนกวงจรวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

โดยแบ่งออกเป็นระบบย่อย 4 ระบบย่อย ซึ่งมีหน่วยในระบบย่อยทั้งหมด 12 หน่วย และกิจกรรมต่างๆ ในระบบย่อยอีก 21 กิจกรรม ดังตารางที่ 2-2

1. ระบบย่อยการปลูกป่ายูคาลิปตัส (Eucalyptus Forestry Sub-System)

ระบบการผลิตวัตถุดิบ ก่อนเข้าสู่โรงงานผลิตเยื่อ โดยแบ่งออกเป็น 4 หน่วย คือ การเพาะเมล็ดยูคาลิปตัส การปลูกต้นยูคาลิปตัส การเก็บเกี่ยวยูคาลิปตัส และการขนส่งไม้ยูคาลิปตัสเข้าสู่โรงงานผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์

2. ระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการคราฟท์ (Kraft Pulp Production Sub-System)

ระบบย่อยการเปลี่ยนวัตถุดิบจากท่อนไม้ยูคาลิปตัสให้เป็นเยื่อเพื่อนำไปผลิตกระดาษต่อไป แบ่งออกเป็น 4 หน่วย คือ การผลิตเยื่อยูคาลิปตัส การผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์ (ค่าพลังงานไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการผลิตเยื่อคิดอยู่ในรูปของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล) การนำกลับคืนสารเคมีเพื่อใช้ในกิจกรรมการต้มเยื่อ และการบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 2-1 ปริมาณระดับกิจกรรมทางสิ่งแวดล้อมที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่กำลังการผลิต 1,000,000 ตัน/ปี

ระบบย่อย	แหล่ง	กิจกรรม	ปริมาณ*	หน่วย	อ้างอิง
ป่ายูคาลิปตัส	การเพาะเมล็ดยูคาลิปตัส	ปุ๋ย N	7	Ton/year	Jawjit *et al.* (2006)
		ปุ๋ย P	3	Ton/year	Jawjit *et al.* (2006)
	การปลูกยูคาลิปตัส	ปุ๋ย N	1,055	Ton/year	Advance Agro Public Co., Ltd. (2550)
		ปุ๋ย P	1,055	Ton/year	Advance Agro Public Co., Ltd. (2550)
	การเก็บเกี่ยวต้นยูคาลิปตัส	น้ำมันดีเซล	695,111	Kg fuel/year	Jawjit *et al.* (2006)
	การขนส่งไม้ยูคาลิปตัส	น้ำมันดีเซล	2,040,000	Kg fuel/year	Jawjit *et al.* (2006)
ผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์	การผลิตเยื่อ	ClO_2	1,600	Ton/year	DIW (1999)
	การผลิตพลังงาน	เปลือกไม้	18,576	TJ/year	สมพร และคณะ (2543)
	การนำกลับคืนสารเคมี	ปูนขาว	120,000	Ton/year	DIW (1999)
		น้ำมันเตา	4,593	TJ/year	DIW (1999)
	การบำบัดน้ำเสีย	ปริมาณน้ำเสีย	18,648,000	m^3/year	สมพร และคณะ (2543)
ผลิตกระดาษพิมพ์เขียน	การผลิตพลังงาน	เปลือกไม้	12,610	TJ/year	สมพร และคณะ (2543)
	การบำบัดน้ำเสีย	ปริมาณน้ำเสีย	13,000,000	m^3/year	สมพร และคณะ (2543)
การจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน	การกำจัดกระดาษ	ฝังกลบ	214,485	Ton/year	SWLF (2007)
		เผา	11,142	Ton/year	SWLF (2007)
		เทกองกลางแจ้ง	774,373	Ton/year	SWLF (2007)

หมายเหตุ * หมายถึง วิธีการคำนวณปริมาณวัตถุดิบต่างๆ ดูได้จากภาคผนวก ก

3. ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Paper Production Sub-System)

ระบบย่อยการนำเยื่อที่ผ่านกระบวนการฟอกมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษพิมพ์เขียน และตัดแต่งเพื่อความเหมาะสมของการนำไปใช้งานต่อไป ในที่นี่แบ่งส่วนการพิจารณาออกเป็น 2 หน่วย คือ การผลิต และการบำบัดน้ำเสีย

4. ระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน (Paper Disposal Sub-System)

ระบบย่อยการกำจัดกระดาษพิมพ์เขียนซึ่งพิจารณากระดาษพิมพ์เขียนทั้งหมดที่เกิดขึ้น และแบ่งสัดส่วนการนำไปกำจัดตาม (SWLF, 2007) โดยวิธีการกำจัดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การฝังกลบ การเผา และเทกองกลางแจ้ง

2.1.3.2 จำแนกกิจกรรมต่างๆ ในแต่ละหน่วยที่สำคัญในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งมีกิจกรรมทั้งหมดมี 21 กิจกรรม ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 กิจกรรมต่างๆ ภายในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

ระบบย่อย	หน่วย	กิจกรรม
1. การปลูกป่ายูคาลิปตัส		
	เพาะเมล็ดยูคาลิปตัส	- การใช้ปุ๋ย
	ปลูกต้นยูคาลิปตัส	- การใช้ปุ๋ย
	เก็บเกี่ยว	- การใช้น้ำมัน (Diesel)
	ขนส่ง	- การใช้น้ำมัน (Diesel)
2. การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์		
	ผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วย	- การทำความสะอาดชิ้นไม้
	กระบวนการคราฟท์	- การต้มเยื่อ
		- การล้างเยื่อ
		- การฟอกเยื่อ
	ผลิตพลังงาน	- การเผาไหม้ชีวมวล (เปลือกไม้)
	นำกลับคืนสารเคมี	- การทำระเหย
		- การเผาไหม้ของเหลวดำ (Recovery Boiler)
		- การพักของเหลวเขียว (Smelt) ในถัง
		- การเผาปูนขาว
		- การเผาน้ำมันเตา

ตารางที่ 2-2 กิจกรรมต่างๆ ภายในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (ต่อ)

ระบบย่อย	หน่วย	กิจกรรม
	บำบัดน้ำเสีย	- การย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือ การเติมธาตุอาหารแก่จุลินทรีย์
3. การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน		
	ผลิตกระดาษ	- การรีดน้ำออก
	ผลิตพลังงาน	- การเผาไหม้ชีวมวล (เปลือกไม้)
	บำบัดน้ำเสีย	- การย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือ การเติมธาตุอาหารแก่จุลินทรีย์
4. การจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน		
	กำจัดขั้นสุดท้าย	- การฝังกลบ
		- การเผา
		- เทกองกลางแจ้ง

2.1.3.3 คำนวณหาค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score)

การสรุปรวมผลของบัญชีรายการต่างๆ ที่ได้ ให้อยู่ในรูปของค่าการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมทั้งหมดที่ผู้วิจัยนำมาพิจารณา โดยคำนวณได้จาก สมการที่ (2-1) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกิจกรรม (ปริมาณการใช้วัตถุดิบ) คูณกับ ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Factor: EF) ดังตารางที่ 2-3 โดยกระดาษ 1 ตัน มีเยื่อผสมอยู่ร้อยละ 80 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 20 เป็นสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตกระดาษ (Advance Agro Public Co., Ltd., 2551) ดังนั้นการประเมินผลกระทบในการศึกษาครั้งนี้ที่กำลังการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน 1,000,000 ตัน/ปี จึงใช้เยื่อเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนที่กำลังการผลิตเยื่อ 800,000 ตัน/ปี

$$Emission\ \ Score = Activity \times Emission\ \ factor \qquad (2\text{-}1)$$

2.1.3.4 จำแนกชนิดของปัญหา (Classification) จากค่าการปลดปล่อยมลพิษของแต่ละกิจกรรมที่เกิดขึ้น และมีผลต่อสิ่งแวดล้อม

การจำแนกมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนให้อยู่ในกลุ่มของผลกระทบ ทั้ง 5 ประเภทที่นำมาพิจารณา โดยมลสาร (อากาศและน้ำเสีย) ที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นสาเหตุของการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละชนิดที่นำมาพิจารณาโดยตรง

ตารางที่ 2-3 ค่าตัวคูณผลกระทบ (Emission Factor: EF) แต่ละตัวที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

แหล่งที่มา	มลสาร	Emission Factor	หน่วย	อ้างอิง
1. การเพาะเมล็ด และปลูกยูคาลิปตัส				
การใช้ปุ๋ย N	N_2O	0.03	kg N_2O-N/kg N	IPCC (1997)
	NO_x	0.025	kg NO_x -N/kg N	IPCC (1997)
	NO_3^-	0.35	kg NO_3^--N/kg N	IPCC (1997)
การใช้ปุ๋ย P	PO_4^{3-}	0.2	kg PO_4^{3-}-N/kg P	IPCC (1997)
2. การเก็บเกี่ยวยูคาลิปตัส				
การใช้น้ำมัน (Diesel)	CO_2	3,150	g/kg Fuel	Schwaiger and Zimmer (1995)
	N_2O	0.02	g/kg Fuel	Schwaiger and Zimmer (1995)
	CH_4	6.91	g/kg Fuel	Schwaiger และ Zimmer (1995)
	NO_x	50	g/kg Fuel	IPCC (1997)
	CO	15	g/kg Fuel	IPCC (1997)
	NMVOC	6.5	g/kg Fuel	IPCC (1997)

ตารางที่ 2-3 ค่าตัวคูณผลกระทบ (Emission Factor: EF) แต่ละตัวที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (ต่อ)

แหล่งที่มา	มลสาร	Emission Factor	หน่วย	อ้างอิง
3. การขนส่งยูคาลิปตัส				
การใช้น้ำมัน (Diesel)	CO_2	3,180	g/kg Fuel	Schwaiger and Zimmer (1995)
	N_2O	0.1	g/kg Fuel	Schwaiger and Zimmer (1995)
	CH_4	0.2	g/kg Fuel	Schwaiger and Zimmer (1995)
	NO_x	29.8	g/kg Fuel	IPCC (1997)
	CO	14	g/kg Fuel	IPCC (1997)
	NMVOC	4.7	g/kg Fuel	IPCC (1997)
	SO_2	20	g/kg Fuel	PCD (1996)
4. การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์				
การล้างชิ้นไม้	COD	3	kg/ton dried pulp	EC (2001)
การต้มเยื่อ	TRS	2.5	kg/ton dried pulp	EC (2001)
	NMVOC	0.1	kg/ton dried pulp	EC (2001)
การล้างเยื่อ	COD	6	kg/ton dried pulp	EC (2001)
	NMVOC	0.27	kg/ton dried pulp	CORINAIR (2000)
การฟอกเยื่อ	COD	11	kg/ton dried pulp	EC (2001)
	N	0.19	kg/ton dried pulp	DIW (1999)
	P	0.32	kg/ton dried pulp	DIW (1999)
	NMVOC	0.05	kg/ton dried pulp	EC (2001)
	AOX	0.1	kg/kg bleaching	EPA (1993)

ตารางที่ 2-3 ค่าตัวคูณผลกระทบ (Emission Factor: EF) แต่ละตัวที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (ต่อ)

แหล่งที่มา	มลสาร	Emission Factor	หน่วย	อ้างอิง
5. การผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงเยื่อ				
เผาไหม้ชีวมวล	CO_2	110	ton/TJ	IPCC (1997)
	CH_4	30	kg/TJ	IPCC (1997)
	N_2O	4	kg/TJ	IPCC (1997)
	CO	4,000	kg/TJ	IPCC (1997)
	NO_x	100	kg/TJ	IPCC (1997)
	NMVOC	50	kg/TJ	IPCC (1997)
	Particulates (ฝุ่น)	1	kg/ton dried pulp	EC (2001)
6. การนำกลับคืนสารเคมี				
การทำระเหย	TRS	0.001	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)
	NMVOC	0.05	kg/ton dried pulp	EC (2001)
เผาไหม้ ของเหลวดำ	CO_2	6	kg/ton dried pulp	DIW (1999)
	SO_2	0.2	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)
	NO_x	1.03	kg/ton dried pulp	CORINAIR (2000)
	CO	5.5	kg/ton dried pulp	CORINAIR (2000)
	TRS	0.003	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)
	NMVOC	0.332	kg/ton dried pulp	CORINAIR (2000)
	Particulates (ฝุ่น)	1.2	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)

ตารางที่ 2-3 ค่าตัวคูณผลกระทบ (Emission Factor: EF) แต่ละตัวที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (ต่อ)

แหล่งที่มา	มลสาร	Emission Factor	หน่วย	อ้างอิง
ถังพักของเหลวเขียว (Smelt Tank)	SO_2	0.03	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)
	NO_x	0.01	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)
	TRS	0.009	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)
	Particulates (ฝุ่น)	0.1	kg/ton dried pulp	Bordado and Gomes (2003)
เผาปูนขาว	CO_2	0.44	ton/ton lime mud	ERIC and TPPIA (2002)
	SO_2	0.55	kg/ton dried pulp	Poyry (1992)
	NO_x	0.33	kg/ton dried pulp	Poyry (1992)
	Particulates	0.1	kg/ton dried pulp	Poyry (1992)
เผาไหม้น้ำมันเตา	CO_2	77.4	ton/TJ	IPCC (1997)
	CH_4	2	kg/TJ	IPCC (1997)
	N_2O	0.6	kg/TJ	IPCC (1997)
	SO_2	1,194	kg/TJ	IPCC (1997)
	NO_x	200	kg/TJ	IPCC (1997)
	CO	10	kg/TJ	IPCC (1997)
	NMVOC	5	kg/TJ	IPCC (1997)

ตารางที่ 2-3 ค่าตัวคูณผลกระทบ (Emission Factor: EF) แต่ละตัวที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (ต่อ)

แหล่งที่มา	มลสาร	Emission Factor	หน่วย	อ้างอิง
7. การบำบัดน้ำเสียโรงผลิตเยื่อคราฟท์				
ระบบบำบัดแบบชีวภาพ	CO_2	339.1	g/m^3	CORINAIR (2000)
	CH_4	3.7	g/m^3	CORINAIR (2000)
	N_2O	0.25	g/m^3	CORINAIR (2000)
	P	0.84	kg/ton dried pulp	IPCC(1997)
8. การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน				
รีดน้ำออก	COD	35	kg/ton paper	World Bank (1998)
	N	0.15	kg/ton paper	World Bank (1998)
	P	0.05	kg/ton paper	World Bank (1998)
9. การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน				
เผาไหม้ชีวมวล	CO_2	110	ton/TJ	IPCC (1997)
	CH_4	30	kg/TJ	IPCC (1997)
	N_2O	4	kg/TJ	IPCC (1997)
	CO	4,000	kg/TJ	IPCC (1997)
	NO_x	100	kg/TJ	IPCC (1997)
	NMVOC	50	kg/TJ	IPCC (1997)
	Particulates (ฝุ่น)	1	kg/ton dried pulp	EC (2001)

ตารางที่ 2-3 ค่าตัวคูณผลกระทบ (Emission Factor: EF) แต่ละตัวที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (ต่อ)

แหล่งที่มา	มลสาร	Emission Factor	หน่วย	อ้างอิง
10. การบำบัดน้ำเสียโรงผลิตกระดาษพิมพ์เขียน				
ระบบบำบัดแบบชีวภาพ	CO_2	339.1	g/m^3	CORINAIR (2000)
	CH_4	3.7	g/m^3	CORINAIR (2000)
	N_2O	0.25	g/m^3	CORINAIR (2000)
	P	0.84	kg/ton paper	DIW (1999)
11. การจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน				
การฝังกลบ	CO_2	775.28	kg/ton paper	Ongmonkolkul *et al.* (2001)
	CH_4	55.38	kg/ton paper	Ongmonkolkul *et al.* (2001)
	NH_3	3.57	kg/ton paper	Ongmonkolkul *et al.* (2001)
การเผา	CO_2	1,613.33	kg/ton paper	IPCC (2006)
	N_2O	10	g/ton paper	IPCC (2006)
เทกองกลางแจ้ง	CO_2	775.28	kg/ton paper	Ongmonkolkul *et al.* (2001)
	CH_4	0.033	ton/ton paper	IGES (2008)

มลสารต่างๆ ที่ถูกจัดเข้ากลุ่มผลกระทบแต่ละประเภท ไม่สามารถรวมกันได้ ต้องทำให้มีหน่วยเปรียบเทียบเหมือนกันทั้งหมดก่อนในแต่ละผลกระทบ โดยนำมาคูณกับค่าความสามารถจำเพาะในการก่อให้เกิดผลกระทบ (Characterization Factor: CF) แต่ละประเภทเภท ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ค่าความสามารถจำเพาะในการก่อให้เกิดผลกระทบ (Characterization Factor: CF) แต่ละประเภท

ประเภทผลกระทบ	มลสาร	Characterization Factor (CF)	อ้างอิง
สภาวะโลกร้อน (Global Warming)	CO_2	1 kg =1 kg-CO_2-eq	IPCC (2001)
	CH_4	1 kg = 23 kg-CO_2-eq	IPCC (2001)
	N_2O	1 kg = 296 kg-CO_2-eq	IPCC (2001)
สภาวะฝนกรด (Acidification)	SO_2	1 kg = 1 kg-SO_2-eq	Heijung *et al.* (1992)
	NO_x	1 kg = 0.71 kg-SO_2-eq	Heijung *et al.* (1992)
	NH_3	1 kg = 1.88 kg-SO_2-eq	Heijung *et al.* (1992)
	TRS	1 kg = 1.88 kg-SO_2-eq	Hauschild and Wenzel (1998)
สภาวะยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication)	PO_4^{3-}	1 kg = 1 kg-PO_4^{3-}-eq	Lindfors (1995)
	NO_x	1 kg = 0.13 kg-PO_4^{3-}-eq	Lindfors (1995)
	NO_3	1 kg = 0.1 kg-PO_4^{3-}-eq	Lindfors (1995)
	N	1 kg = 0.42 kg-PO_4^{3-}-eq	Lindfors (1995)
	P	1 kg = 3.06 kg-PO_4^{3-}-eq	Lindfors (1995)
	COD	1 kg = 0.022 kg-PO_4^{3-}-eq	Lindfors (1995)
	NH_3	1 kg = 0.35 kg- PO_4^{3-}-eq	Lindfors (1995)
สภาวะหมอกควันพิษ (Smog)	C_2H_4	1 kg = 1 kg-C_2H_4-eq	Jawjit (2006)
	NMVOC	1 kg = 0.416 kg-C_2H_4-eq	Goedkoop (2000)
	CO	1 kg = 0.027 kg-C_2H_4-eq	Goedkoop (2000)
	CH_4	1 kg = 0.006 kg-C_2H_4-eq	Goedkoop (2000)
	NO_x	1 kg = 0.028 kg-C_2H_4-eq	Goedkoop (2000)
สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Toxicity)	AOX	1 kg = 1 kg-$C_2H_4Cl_6$-eq	CML (2002)
	TRS	1 kg = 0.22 kg-$C_2H_4Cl_6$-eq	CML (2002)
	SO_2	1 kg = 0.096 kg-$C_2H_4Cl_6$-eq	CML (2002)
	NO_x	1 kg = 1.2 kg-$C_2H_4Cl_6$-eq	CML (2002)
	Particulates	1 kg = 0.82 kg-$C_2H_4Cl_6$-eq	CML (2002)

2.2.3.5 การระบุค่าศักยภาพ (Characterization) ของมลสารแต่ละชนิดที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเภท

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วค่าการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้น และถูกจำแนกเข้าสู่ประเภทของผลกระทบแต่ละประเภท จะต้องเปลี่ยนหน่วยเทียบค่า (Equivalent: eq) ของแต่ละมลสาร ให้อยู่ในหน่วยเปรียบเทียบเดียวกันทั้งหมด ในแต่ประเภทของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เพื่อรวมค่าการเกิดผลกระทบแต่ละประเภทผลกระทบ

2.1.3.6 คำนวณหาค่าการก่อมลพิษ (Effect Score)

การเปลี่ยนค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) แต่ละตัวให้อยู่ในหน่วยเปรียบเทียบเดียวกันทั้งหมดในแต่ละประเภทผลกระทบ จากตารางที่ 2-4 เพื่อรวมมลสารต่างๆ เข้ากลุ่มประเภทของผลกระทบ คำนวณได้จากสมการที่ (2-2)

$$Effect\ \ Score = Emission\ \ Score \times Characterization\ \ factor \qquad (2\text{-}2)$$

2.1.3.7 การสรุปผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

สรุปผลการคำนวณที่เกิดขึ้นในแต่ละผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่นำมาพิจารณาในรูปแบบตารางเพื่อความสะดวกในการดำเนินการในขั้นตอนต่อไป ซึ่งแสดงผลในบทที่ 3

2.1.3.8 การปรับค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นให้เป็นค่าปกติ (Normalization)

การปรับค่าผลกระทบแต่ละประเภท (Effect Score) ให้อยู่ในรูปเดียวกัน คือ ไม่มีหน่วยเพื่อเปรียบเทียบความสำคัญของแต่ละประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้น คำนวณได้จากสมการที่ (2-3) ผลที่ได้ คือ ค่าผลกระทบปกติ (Normalized Effect Score) ค่าตัวคูณปกติ (Normalization Factor: NF) แสดงดังตารางที่ 2-5

$$Normalized\ effect\ score = Effect\ score / Normalization\ \ factor \qquad (2\text{-}3)$$

2.1.3.9 การให้คะแนน (Weighting) ผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท

การให้ น้ำหนักความสำคัญ (Weighting Factor) กับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดทั้ง 5 ประเภท ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ให้ความสำคัญกับผลกระทบที่เกิดขึ้นแต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน คือ 1 โดยคำนวณได้ดังสมการที่ (2-4)

$$Overall = \sum (Normalized\ \ effect\ \ score \times Weighting\ \ factor) \tag{2-4}$$

ผลรวมของการคำนวณที่ได้จากการทำ Normalization และการให้ Weighting กับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่นำมาพิจารณาในการประเมินวัฏจักรชีวิตการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนในครั้งนี้ คือ ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั้งหมดในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งแสดงผลการประเมินไว้ในบทที่ 3

ตารางที่ 2-5 ค่าตัวคูณค่าปกติ (Normalization Factor: NF) ของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท

ประเภทผลกระทบ	ตัวคูณปกติ (NF)	อ้างอิง
สภาวะโลกร้อน	4.10E+10	CML (2004)
สภาวะฝนกรด	3.2E+08	CML (2004)
สภาวะยูโทรฟิเคชั่น	1.3E+08	CML (2004)
สภาวะหมอกควันพิษ	9.6E+07	CML (2004)
สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์	5.7E+10	CML (2004)

ตัวอย่างการคำนวณค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) และค่าผลกระทบ (Effect Score) ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา แสดงดังตารางที่ 2-6 และ 2-7

ตารางที่ 2-6 ตัวอย่างการคำนวณค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา

กิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา ปริมาณ 4,593 TJ/Year				
มลสาร	**Emission Factor**	**หน่วย**	**Emission Score**	**หน่วย**
CO_2	77.4	ton/TJ	355,464	ton-CO_2/yr
CH_4	2	kg/TJ	9	ton-CH_4/yr
N_2O	0.6	kg/TJ	3	ton-N_2O/yr
SO_2	1,194	kg/TJ	5,484	ton-SO_2/yr
NO_x	200	kg/TJ	919	ton-NO_x/yr
CO	10	kg/TJ	46	ton-CO/yr
NMVOC	5	kg/TJ	23	ton-NMVOC/yr

ตารางที่ 2-7 ตัวอย่างการคำนวณค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Effect Score) จากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา

ประเภทผลกระทบ	**มลสาร**	**Characterization Factor**	**Effect Score**	**หน่วย**
สภาวะโลกร้อน	CO_2	1 kg =1 kg-CO_2-eq	355,464	ton-CO_2-eq
	CH_4	1 kg = 23 kg-CO_2-eq	211	
	N_2O	1 kg = 296 kg-CO_2-eq	816	
สภาวะฝนกรด	SO_2	1 kg = 1 kg-SO_2-eq	5,484	ton-SO_2-eq
	NO_x	1 kg = 0.71 kg-SO_2-eq	652	
สภาวะยูโทรฟิเคชั่น	NO_x	1 kg = 0.13 kg-PO_4^{3-}-eq	119	ton-PO_4^{3-}-eq
สภาวะหมอกควันพิษ	NMVOC	1 kg = 0.416 kg-C_2H_4-eq	10	ton-C_2H_4-eq
	CO	1 kg = 0.027 kg-C_2H_4-eq	1	
	CH_4	1 kg = 0.006 kg-C_2H_4-eq	0.1	
	NO_x	1 kg = 0.028 kg-C_2H_4-eq	26	
สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์	SO_2	1 kg = 0.096 kg-$C_6H_4Cl_2$-eq	526	ton- $C_6H_4Cl_2$-eq
	NO_x	1 kg = 1.2 kg-$C_6H_4Cl_2$-eq	1,102	

2.1.4 การศึกษาทางเลือกการลดมลพิษ (Pollution Reduction Option)

ทางเลือกที่นำมาศึกษาพิจารณาจากมลสารต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบ เรียงลำดับตามการปลดปล่อยของมลสารแต่ละชนิดที่รวมกันมากกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 80 ในแต่ละกิจกรรมที่สำคัญ

2.1.4.1 คัดเลือกมลสารที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม และก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวมกันมากกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 80 ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเภท เพื่อศึกษา และหาทางเลือกสำหรับนำมาใช้ลดมลสารต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรม โดยค่าการปลดปล่อยมลสารที่นำมารวมกันนั้นอยู่ในรูปของค่า Effect Score ของแต่ละประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ถูกเปลี่ยนหน่วยเปรียบเทียบให้อยู่ในหน่วยเดียวกันทั้งหมดของแต่ละประเภทผลกระทบ

2.1.4.2 การศึกษาทางเลือก คือ ศึกษาทางเลือกที่นำมาใช้ได้จริงในปัจจุบัน และเหมาะสำหรับนำไปใช้ในอนาคต ทางเลือกที่นำไปใช้อนาคต คือ ทางเลือกที่ต้องศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น และค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นหากนำมาใช้จริง เพื่อลดการปลดปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมแต่ละกิจกรรมในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

2.1.4.3 การศึกษาผลกระทบข้างเคียง (Side Effect of Option) คือ การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น จากการนำทางเลือกมาใช้เพื่อลดมลสารชนิดต่างๆ ซึ่งมีทั้งผลกระทบด้านบวก คือ ผลกระทบที่นำมาใช้ในการลดมลสารที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบ และส่งผลต่อการลดมลสารชนิดอื่นด้วย และผลกระทบด้านลบ คือ ผลกระทบที่นำมาใช้ในการลดมลสารที่มีส่วนในการลดผลกระทบ และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมลสารชนิดอื่น

2.1.4.4 ประเมินประสิทธิภาพของแต่ละทางเลือกที่นำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารจากกิจกรรมต่างๆ ดังภาคผนวก ข ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการประเมินเบื้องต้นเป็นการประเมินกรณีอ้างอิง คือ กรณีที่โรงงานไม่มีการนำวิธีการจัดการมาใช้ในการลดการเกิดผลกระทบต่างๆ และนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินประสิทธิภาพของการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ คำนวณจากสมการที่ (2-5)

$$Eff\ (\%) = \frac{[\sum M_{\mu}(refference) - \sum M_{\mu}(option)] \times 100}{\sum M_{\mu}(refference)} \qquad (2\text{-}5)$$

โดย

Eff คือ ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้

M_{μ} คือ ปริมาณมลสารที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละประเภท

μ คือ ผลกระทบแต่ละประเภท

$\sum M_{\mu}(refference)$ คือ ปริมาณมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละประเภทในกรณีอ้างอิง (ก่อนนำทางเลือกมาใช้)

$\sum M_{\mu}(option)$ คือ ปริมาณมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละประเภทของแต่ละทางเลือก (Option) ที่นำมาใช้

2.1.5 กรณีศึกษา

แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ และกรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อม

2.1.5.1 กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารจากกิจกรรมต่างๆ

การศึกษากรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ เพื่อประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการการนำทางเลือกมาใช้ที่แตกต่างกัน

1. สอบถามข้อมูลจากโรงงาน ด้วยแบบสอบถาม ดังภาคผนวก ค เพื่อนำทางเลือกที่โรงงานใช้มาเป็นข้อมูลสำหรับประเมินผลกระทบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากกรณีทางเลือกที่โรงงานนำมาใช้ในการผลิตปัจจุบัน (M-Current)

2. คัดเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดในแต่ละกิจกรรม คือ คัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่สามารถลดผลกระทบโดยรวมที่เกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรมได้มากที่สุด มาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินผลกระทบกรณีทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max)

3. ประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่กรณี คือ กรณีไม่มีการจัดการ (M-Reference) กรณีปัจจุบัน (M-Current) และกรณีที่ดีที่สุด (M-Max) โดยทางเลือกที่ถูกคัดเลือก และนำมาใช้ในการประเมินกับแบบจำลอง

4. ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกรณีต่างๆ ที่มีการนำทางเลือกมาใช้ ถูกนำมาทำให้เป็นค่าปกติโดยหารด้วยค่าตัวคูณปกติ จากตารางที่ 2-6 รวมถึงให้น้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นเท่ากัน คือ 1 และรวมผลกระทบทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีเป็นค่าเดียว คือ ค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall)

2.1.5.2 กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ (Geographical Scale)

การศึกษาระดับความรุนแรงของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่นำมาประเมินผลในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับโลก ระดับภูมิภาค และระดับท้องถิ่น มีวัตถุประสงค์ในการประเมิน เพื่อศึกษาความแตกต่างของนโยบายสิ่งแวดล้อม

1. คัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสามารถลดผลกระทบโลกร้อนได้มากที่สุดในแต่ละกิจกรรม มาใช้กับแบบจำลองเพื่อประเมินผลกระทบกรณีการให้ความสำคัญกับผลระทบที่เกิดขึ้นในระดับโลก (M-Global)

2. คัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสามารถลดผลกระทบฝนกรดได้มากที่สุดในแต่ละกิจกรรม มาใช้กับแบบจำลองเพื่อประเมินผลกระทบกรณีการให้ความสำคัญกับผลระทบที่เกิดขึ้นในระดับภูมิภาค (M-Regional)

3. คัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสามารถลดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้มากที่สุดในแต่ละกิจกรรม มาใช้กับแบบจำลองเพื่อประเมินผลกระทบกรณีการให้ความสำคัญกับผลระทบที่เกิดขึ้นในระดับท้องถิ่น (M-Local)

4. ประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้น และปรับค่าผลกระทบที่ได้ให้อยู่ในรูปของค่าปกติ

5. การให้น้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่นำมาพิจารณา คือ ระดับโลก ระดับภูมิภาค และระดับท้องถิ่น ใช้การคำนวณหาค่าตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) ผลกระทบ ด้วยวิธี The Analytical Hierarchy Process: AHP หรือวิธีการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (ชิมมี่ วางโม, 2551) ดังตารางที่ 2-8 ซึ่งเป็นวิธีการกำหนดสัดส่วนน้ำหนักคะแนนของแต่ละผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอื่นแบบจับคู่ (DIFOR, 1999) ดังภาคผนวก ง การให้น้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน นำไปสู่การได้มาซึ่งผลกระทบโดยรวม (Overall) ที่มีค่าแตกต่างกันออกไปตามลำดับการให้น้ำหนักความสำคัญที่นำมาพิจารณา และเปรียบเทียบ

ผลกระทบโดยรวมที่ได้กับกรณีปัจจุบัน (M-Current) ซึ่งตัวคูณการให้น้ำหนักความสำคัญของกรณีปัจจุบันจากเดิม คือ 1 จะต้องหารด้วย 5 เพื่อปรับค่าตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) ของกรณีปัจจุบันให้อยู่ในฐานผลรวมเท่ากันกับกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ คือ 1

ตารางที่ 2-8 ตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) ของแต่ละผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์

ประเภทผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	**Weighting Factor**		
	โลก	**ภูมิภาค**	**ท้องถิ่น**
โลกร้อน	0.42	0.06	0.06
ฝนกรด	0.26	0.34	0.10
ยูโทรฟิเคชั่น	0.16	0.34	0.16
หมอกควันพิษ	0.09	0.13	0.26
ความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์	0.06	0.13	0.42

ที่มา : Hermann *et al.* (2007)

2.1.5.3 กรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Sensitivity Analysis)

การศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (Replacement of Bunker Oil by Biomass: M-Fuel) และกรณีการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสีย (Waste Paper Recycling: M-Recycle) เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิง และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน

1. กรณีการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งสัดส่วนการแทนที่ออกเป็น 3 สัดส่วน คือ แทนที่ที่สัดส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 เนื่องจาก เชื้อเพลิงชีวมวลถูกนำมาใช้ในการผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่ออยู่แล้ว ดังนั้น เชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือจึงไม่สามารถแทนที่น้ำมันได้ทั้งหมด เพราะ ค่าความร้อนที่เท่ากันต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล

มากกว่า ซึ่งค่าความร้อนของการเผาไหม้น้ำมันเตามีค่ามากกว่าค่าความร้อนของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล 2 เท่า (EPPO, 2009) ในปริมาณการเผาไหม้เชื้อเพลิงเท่ากัน

2. กรณีการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียแบ่งสัดส่วนการแทนที่ออกเป็น 3 สัดส่วน คือ 5 10 และ 20 เนื่องจากโดยทั่วไปการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนนำกระดาษเสียมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตที่สัดส่วนน้อยกว่า 1.2 เพราะ ทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีคุณภาพต่ำ (สมาคมการพิมพ์ไทย, 2551)

3. คำนวณหาค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) แต่ละกรณี และจำแนกชนิดของปัญหา (Classification) จัดกลุ่มมลสารต่างๆ ให้มีหน่วยเดียวกันในแต่ละประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อม ปรับค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภทที่ได้จากการคำนวณให้เป็นค่าปกติ (Normalized Environmental Impact) และให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting) กับผลกระทบที่เกิดขึ้นเท่ากันทั้งหมด คือ 1

2.1.6 สรุป และวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย

2.1.6.1 สรุปทางเลือกที่สามารถลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

2.1.6.2 สรุปกระทบที่เกิดขึ้นจากกรณีศึกษาต่างๆ

2.1.6.3 วิเคราะห์ และอภิปรายผลการดำเนินงานวิจัย

2.1.6.4 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด และเสนอแนะแนวทางแก่โรงงานรวมถึงผู้วิจัยที่สนใจจะทำงานวิจัยต่อจากงานวิจัยครั้งนี้

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามหลักการการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยใช้แบบจำลองในงานวิจัยครั้งนี้ ทำให้ทราบถึงสาเหตุของปัญหาที่ควรแก้ไขภายใต้วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่กำหนดขึ้น และแบบจำลองที่นำมาใช้ในการประเมินครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกรณีศึกษาที่แตกต่างกันออกไปได้ รายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory Analysis)

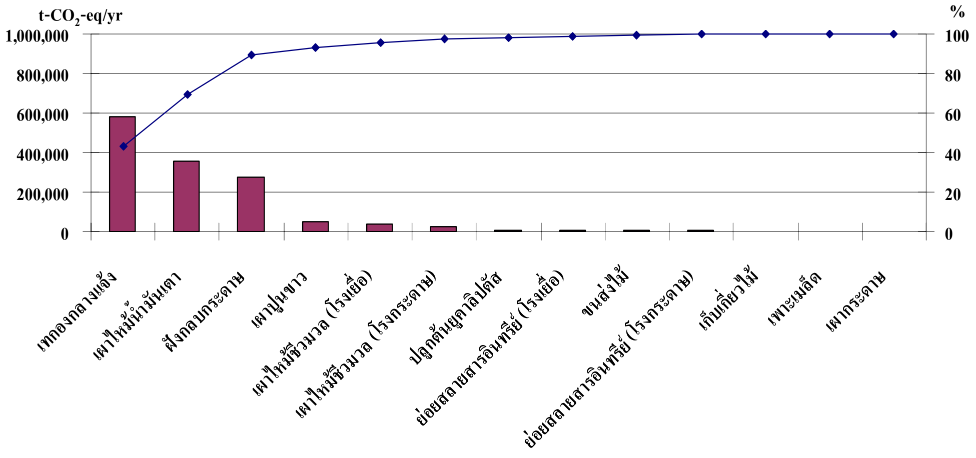
จากการวิเคราะห์บัญชีรายการเพื่อคำนวณหาปริมาณการปลดปล่อยมลสารต่างๆ (สารขาเข้า และขาออก) และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตจากเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดซึ่งมีระบบย่อย 4 ระบบย่อยประกอบด้วยกิจกรรม 21 กิจกรรม ดังตารางที่ 2-2 ผลการประเมินที่เกิดขึ้นจากการกำหนดสถานการณ์การประเมินซึ่งไม่มีวิธีการจัดการในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน มีดังนี้

3.1.1 สภาวะโลกร้อน (Global Warming)

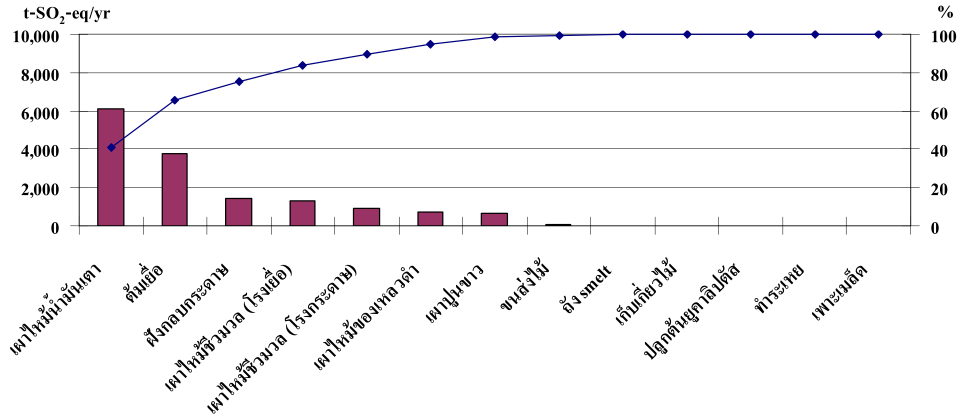
มลสารต่างๆ ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนที่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ คือ CO_2 CH_4 และ N_2O หรือ ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) ซึ่งจะถูกคำนวณให้อยู่ในหน่วยเปรียบเทียบของ t-CO_2-eq/ปี คิดเป็น1,356,357 t-CO_2-eq/ปี จากการประเมิน ดังตารางที่ 3-1 พบว่าระบบย่อยการจัดการกระดาษด้วยวิธีเทกองกลางแจ้ง ก่อให้เกิดผลกระทบโลกร้อนมากที่สุด คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 43 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน (Ongmongkoklkul *et al.*, 2001) ซึ่งก๊าซ CH_4 (Methane) จากกิจกรรมการเทกองกลางแจ้งถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดเท่ากับ 581,337 t-CO_2-eq/ปี สำหรับระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์มลสาร CO_2 จากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตามีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนคิดเป็นร้อยละ 26 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด รองลงมา คือ มลสาร CH_4 จากกิจกรรมการกำจัดกระดาษด้วยวิธีการฝังกลบคิดเป็นร้อยละ 20 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ตามด้วย

กิจกรรมการเผาปูนขาวซึ่งมีมลสาร CO_2 ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมคิดเป็นร้อยละ 4 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด สำหรับมลสาร N_2O (Nitrous Oxide) ที่เกิดขึ้นจากวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนส่งผลกระทบคิดเป็นร้อยละ 4 ของ N_2O ทั้งหมด ซึ่งน้อยมากหากเทียบกับมลสาร CO_2 และ CH_4 ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนโดยมลสาร N_2O ที่เกิดขึ้นถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์เป็นหลัก

อย่างไรก็ตาม แม้ว่ามลสาร CO_2 เป็นมลสารที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมากและมีส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน ดังตารางที่ 3-1 แต่มลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล สามารถกลับเข้าสู่วงจรการเจริญเติบโตของต้นยูคาลิปตัสซึ่งนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อได้ เนื่องจาก ต้นยูคาลิปตัสต้องอาศัยก๊าซ CO_2 ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อปรุงอาหารสำหรับใช้ในการเจริญเติบโต มลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นจึงไม่ถูกนำมาคำนวณเป็นมลสารที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน (IPCC, 1997) นอกจากนี้ระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ในหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีจะต้องมีการเผาปูนขาวร่วมกับของเหลวดำเพื่อนำสารเคมีกลับไปใช้ใหม่ก่อให้เกิดมลสาร CO_2 ขึ้น โดยมลสาร CO_2 ที่ปนเปื้อนอยู่ในกระแสก๊าซจากการเผาปูนขาวนั้น เป็นผลมาจากการต้มชิ้นไม้ยูคาลิปตัสเพื่อทำเยื่อกระดาษ จึงได้ของเหลวดำ (Black Liquor) ออกมา ของเหลวดำที่ได้จึงมีลิกนิน (Lignin) ที่หลุดออกมาจากเนื้อไม้ซึ่งมีคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญอยู่ (ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล, 2552) เมื่อนำของเหลวดำที่ได้มาเผารวมกันกับปูนขาว จึงก่อให้เกิดมลสาร CO_2 ออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นมลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเหลวดำ จึงไม่ถูกนำคำนวณในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจาก มลสาร CO_2 สามารถกลับเข้าสู่วัฏจักรการเจริญเติบโตของต้นยูคาลิปตัสได้ (Miner and Upton, 2002) ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยตลอดวัฏชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนจึงมีค่าลดลงมากถึง 3,625,546 t-CO_2-eq/ปี หรือประมาณร้อยละ 73 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ลดลง แสดงดังภาพประกอบที่ 3-1 และ 3-2 สำหรับการจัดการกระดาษเสียหลังหมดอายุการใช้งานด้วยวิธีการฝังกลบ การเผา และเทกองกลางแจ้ง มลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน เนื่องจาก พิจารณามลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นสามารถกลับเข้าสู่วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนได้จากการดูดซับโดยต้นยูคาลิปตัสซึ่งนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต นอกจากนี้ไม่รวมมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจาก พลังงานไฟฟ้าที่โรงงานผลิตเยื่อ และกระดาษเพียงพอต่อการใช้ของโรงงาน ซึ่งอยู่ในรูปของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



ภาพประกอบที่ 3-1 สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน (รวมมลสาร CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล)



ภาพประกอบที่ 3-2 สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน (ไม่รวมมลสาร CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล)

แม้ว่าก๊าซ CO_2 จะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม และก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อเทียบความรุนแรงแล้ว ก๊าซ CH_4 และ ก๊าซ N_2O มีความรุนแรงมากกว่า CO_2 ที่เกิดขึ้น 23 เท่า และ 269 เท่า (IPCC, 2001) ตามลำดับ ซึ่งนั่นหมายถึงหากเกิดขึ้นในปริมาณที่เท่ากัน มลสาร CH_4 และ N_2O จะส่งผลกระทบต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนมากกว่ามลสาร CO_2 นั่นเอง เช่น กิจกรรมการเทกองกลางแจ้งที่มีผลต่อการเกิดมลสาร CH_4 มากถึง 581,337 t-CO_2-eq/ปี ในที่นี้ปริมาณดังกล่าวถูกปรับค่าให้อยู่ในรูปของหน่วยเปรียบเทียบ (CO_2-eq) แล้ว ซึ่งหากไม่ทำการปรับค่าให้อยู่ในหน่วยเปรียบเทียบ (CO_2-eq) แล้ว มีค่าอยู่ที่ 25,276 t-CH_4/ปี

ตารางที่ 3-1 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) จากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน(ไม่รวมมลสาร CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้ของเหลวดำ การฝังกลบ การเผา และเทกองกลางแจ้งของกระดาษเสีย)

กิจกรรม/มลสาร	**CO_2**		**CH_4**		**N_2O**		**รวม**	**สัดส่วน**
	t/yr	**t-CO_2-eq/yr**	**t/yr**	**t-CO_2-eq/yr**	**t/yr**	**t-CO_2-eq/yr**	**t-CO_2-eq/yr**	**(%)**
การปลูกยูคาลิปตัส								
1.การใช้ปุ๋ย								
-เพาะเมล็ด	0	0	0	0	0.20	58.61	58.61	0.0043
-ปลูกยูคาลิปตัส	0	0	0	0	31.65	9,368.40	9,368.40	0.69
2.การใช้น้ำมัน								
-เก็บเกี่ยว	2,189.60	2,189.60	4.80	110.47	0.01	4.12	2,304.19	0.17
-ขนส่ง	6,487.20	6,487.20	0.41	9.38	0.20	60.38	6,556.97	0.48
การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์								
1.การผลิตพลังงาน								
-เผาไหม้ชีวมวล	2,043,360	2,043,360 (0)	557	12,817	74	21,994	34,811	2.57
2.การนำกลับสารเคมี								
-เผาไหม้ของเหลวดำ	4,800	4,800 (0)	0	0	0	0	0	0
-เผาปูนขาว	52,800	52,800	0	0	0	0	52,800	3.89
-เผาไหม้น้ำมันเตา	355,464	355,464	9.19	211.16	2.76	815.64	356,491.04	26.28

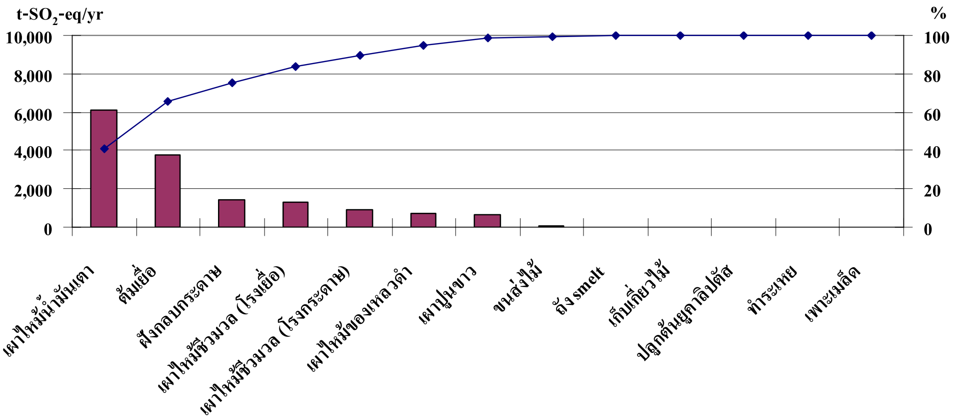
ตารางที่ 3-1 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) จากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน(ไม่รวมมลสาร CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้ของเหลวดำ การฝังกลบ และการเผากระดาษเสีย) (ต่อ)

กิจกรรม/มลสาร	**CO_2**		**CH_4**		**N_2O**		**รวม**	**สัดส่วน**
	t/yr	**t-CO_2-eq/yr**	**t/yr**	**t-CO_2-eq/yr**	**t/yr**	**t-CO_2-eq/yr**	**t-CO_2-eq/yr**	**(%)**
3.การบำบัดน้ำเสีย								
-ย่อยสลายสารอินทรีย์	6,323.54	6,324	69.00	1,586.94	4.66	1,380	9,290.43	0.68
การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน								
1.การผลิตพลังงาน								
-เผาไหม้ชีวมวล	1,387,100	1,387,100 (0)	378.30	8,700.90	50.44	14,930.24	23,631.14	1.74
2.การบำบัดน้ำเสีย								
-ย่อยสลายสารอินทรีย์	4,408	4,408	48	1,106	3	962	6,477	0.48
การจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน								
-ฝังกลบ	166,286	166,286 (0)	11,878.16	273,197	0	0	273,197.72	20.14
-เผา	17,975	17,975 (0)	0	0	0.11	32.98	32.98	0.0024
-เทกองกลางแจ้ง	600,356.10	600,356.10(0)	25,275.4	581,337.49	0	0	581,337.49	42.86
รวม	**427,672.78**	**427,672.78**	**38,220.78**	**879,077.91**	**135.74**	**49,606.30**	**1,356,356.99**	**100**

หมายเหตุ (0) คือ ปริมาณมลสาร CO_2 ที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนของการศึกษาครั้งนี้มีค่าเป็นศูนย์

3.1.2 สภาวะฝนกรด (Acidification)

จากการคำนวณหาค่าการปลดปล่อย มลสารที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ SO_2 NO_x NH_3 และ TRS ซึ่งคิดคำนวณให้อยู่ในรูปของ t-SO_2-eq/ปี เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมของการปลดปล่อยมลพิษที่ก่อให้เกิดสภาวะฝนกรดจากระบบย่อยทั้ง 4 ระบบในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน พบว่าระบบย่อยต่างๆ มีส่วนในการก่อให้เกิดตามสัดส่วนและชนิดของมลสารที่แตกต่างกันออกไป โดยร้อยละ 84 ของมลสารทั้งหมดที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด ถูกปล่อยจากระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ โดยมีกิจกรรม 2 อันดับแรก ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด คือ กิจกรรมการใช้น้ำมันเตา ซึ่งมี SO_2 (Sulfur Dioxide) เป็นมลสารที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมคิดเป็น 5,484 t-SO_2-eq/ปี รองลงมา คือ TRS (Total Reduce Sulfur) จากกิจกรรมการต้มเยื่อเท่ากับ 3,760 t-SO_2-eq/ปี นอกจากนี้วิธีการกำจัดกระดาษด้วยวิธีการฝังกลบก็เป็นส่วนหนึ่งที่มีผลก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเป็นอันดับ 3 รองจากกิจกรรมที่กล่าวมา เนื่องจาก NH_3 (Ammonia) ปริมาณเท่ากับ 1,440 t-SO_2-eq/ นอกจากนี้ NO_x จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัส เท่ากับ 1,319 t-SO_2-eq/ปี และกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน เท่ากับ 895 t-SO_2-eq/ปี ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดซึ่งคิดรวมอยู่ในร้อยละ 80 ของมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมทั้งหมดที่มีผลต่อสภาวะฝนกรด ดังภาพประกอบที่ 3-3 สำหรับระบบย่อยการปลูกยูคาลิปตัส สัดส่วนของการปลดปล่อยมลสารออกสู่สิ่งแวดล้อมมีน้อยกว่าร้อยละ 1 ของผลกระทบสภาวะฝนกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดซึ่งถือว่าน้อยมาก ดังตารางที่ 3-2



ภาพประกอบที่ 3-3 สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด

ตารางที่ 3-2 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด

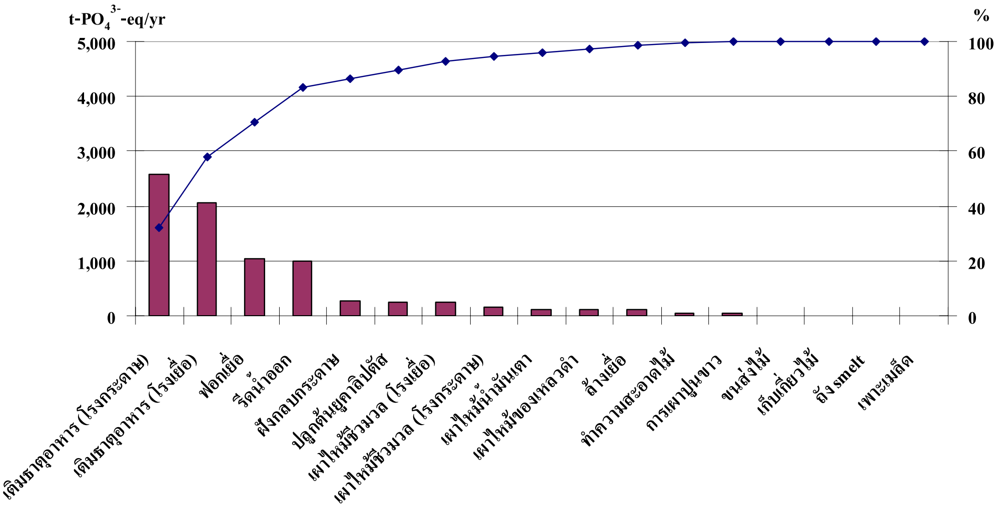
กิจกรรม/มลสาร	SO_2		NO_x		NH_3		TRS		รวม	สัดส่วน
	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t-SO_2-eq/yr	(%)
การปลูกยูคาลิปตัส										
1.การใช้ปุ๋ย										
-เพาะเมล็ด	0	0	0.17	0.12	0	0	0	0	0.12	0.00078
-ปลูกต้นยูคาฯ	0	0	26.38	18.73	0	0	0	0	18.73	0.12
2.การใช้น้ำมัน										
-เก็บเกี่ยว	0	0	34.76	24.68	0	0	0	0	24.68	0.16
-ขนส่ง	40.80	40.80	60.79	43.16	0	0	0	0	83.96	0.56
การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์										
1.ผลิตเยื่อ										
- ต้มเยื่อ	0	0	0	0	0	0	2,000	3,760	3760	24.90
2.การผลิตพลังงาน										
-เผาไหม้ชีวมวล	0	0	1,858	1,318.90	0	0	0	0	1,318.90	8.74
3.การนำกลับสารเคมี										
-ทำระเหย	0	0	0	0	0	0	0.80	1.50	1.50	0.010
-เผาไหม้ของเหลวดำ	160	160	824	585.04	0	0	2.40	4.51	745.04	4.93
-ถัง smelt	24	24	8	5.68	0	0	7.20	13.54	29.68	0.20

ตารางที่ 3-2 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด (ต่อ)

กิจกรรม/มลสาร	SO_2		NO_x		NH_3		TRS		รวม	สัดส่วน
	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t/yr	t-SO_2-eq/yr	t-SO_2-eq/yr	(%)
-เผาปูนขาว	440	440	264	187.44	0	0	0	0	627.44	4.16
-เผาไหม้น้ำมันเตา	5,483.52	5,483.52	918.51	652.14	0	0	0	0	6,135.66	40.64
การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน										
1.การผลิตพลังงาน										
-เผาไหม้ชีวมวล	0	0	1,261.00	895.31	0	0	0	0	895.31	65.93
การจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน										
-ฝังกลบ	0	0	0	0	765.71	1,439.54	0	0	1,439.54	9.53
รวม	**6,148.32**	**6,148.32**	**5,255.20**	**3,731.19**	**765.71**	**1,439.54**	**2,010.40**	**3,779.552**	**15,098.60**	**100**

3.1.3 สภาวะยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication)

มลสารที่ทำให้เกิดสภาวะยูโทรฟิเคชั่นที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ PO_4^{3-} NO_x NO_3 N P COD และ NH_3 และคิดคำนวณมลสารทั้งหมดให้อยู่ในรูป t- PO_4^{3-}-eq/ปี พบว่าระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนปล่อยมลสาร P (Phosphorus) ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุด ในปริมาณ 2,570 t- PO_4^{3-}-eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 47 ของการเกิดผลกระทบยูโทรฟิเคชั่นทั้งหมดในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ในขณะที่ระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ปลดปล่อย P เท่ากับ 2,056 t- PO_4^{3-}-eq/ปี ดังภาพประกอบที่ 3-4



ภาพประกอบที่ 3-4 สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น

สาเหตุของการเกิด P จากทั้ง 2 ระบบย่อย มาจากกิจกรรมการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่จะต้องมีการเติมธาตุอาหารแก่จุลินทรีย์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต และบำบัดน้ำเสีย ซึ่งหากเติมปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดการตกค้างของธาตุอาหาร ส่งผลต่อการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม และเกิดเป็นปัญหาการแพร่กระจายของพืชตามมา นอกจากนี้ยังมี P จากกิจกรรมการฟอกเยื่อ คิดเป็น 783 t- PO_4^{3-}-eq/ปี ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบ เนื่องจาก การหลงเหลืออยู่ขององค์ประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่ในเนื้อไม้ แม้จะถูกต้ม และล้างก่อนนำเข้าสู่ขั้นตอนการฟอกแล้วก็ตาม แต่หากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการต้ม และมีการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสม ปริมาณ P ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากกิจกรรมการฟอกก็จะลดลงได้เช่นกัน สำหรับ COD (Chemical Oxygen Demand) พบว่ากิจกรรมการรีดน้ำออกในระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ปลดปล่อย COD ปนเปื้อนออกมากับน้ำเสียในปริมาณ 770 t- PO_4^{3-}-eq/ปี และการนำน้ำที่ได้จากการรีดมาใช้ใหม่สามารถลดการเกิด COD ลงได้ (Avsar and Demirer, 2008) มลสารชนิดอื่นๆ ดูได้จากตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น

กิจกรรม/มลสาร	**NO_x**		**NO_3**		**N**		**PO_4^{3-}**		**P**		**COD**		**NH_3**		**รวม***	**สัดส่วน (%)**
	t/yr	**t/yr***	**t/yr***	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***		
การปลูกยูคาลิปตัส																
1.การใช้ปุ๋ย																
-เพาะเมล็ด	0.17	0.02	0	2.31	0.23	0	0	0	0	0.616	0.616	0	0	0	0.87	0.011
-ปลูกต้นยูคาฯ	26.38	3.43	0	369.25	36.93	0	0	0	0	211	211	0	0	0	251.35	3.14
2.การใช้น้ำมัน																
-เก็บเกี่ยวยูคาฯ	34.76	4.52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.52	0.06
-ขนส่งไม้ยูคาฯ	60.79	7.90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.90	0.10
การผลิตยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์																
1.การผลิตเยื่อ																
-การทำความสะอาดไม้	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,400	52.80	0	0	52.80	0.66
-การล้างเยื่อ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,800	105.60	0	0	105.60	1.32
-การฟอกเยื่อ	0	0	0	0	152	63.84	0	0	256	783.36	8,800	193.60	0	0	1,040.80	12.99

ตารางที่ 3-3 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น (ต่อ)

กิจกรรม/มลสาร	NO_x		NO_3		N		PO_4^{3-}		P		COD		NH_3		รวม*	สัดส่วน (%)
	t/yr	t/yr*	t/yr*	t/yr*	t/yr	t/yr*	t/yr	t/yr*	t/yr	t/yr*	t/yr	t/yr*	t/yr	t/yr*		
2.การผลิตพลังงาน																
-เผาไหม้ชีวมวล	1,857.60	241.49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	241.49	3.01
3.การนำกลับสารเคมี																
-เผาไหม้ของเหลวดำ	824	107.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107.12	1.34
-ถัง smelt	8	1.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.04	0.01
-การเผาปูนขาว	264	34.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34.32	0.43
-เผาไหม้น้ำมันเตา	918.51	119.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119.41	0.49
4.การบำบัดน้ำเสีย																
-เติมธาตุอาหาร	0	0	0	0	0	0	0	0	672	2,056.32	0	0	0	0	2,056.32	25.67

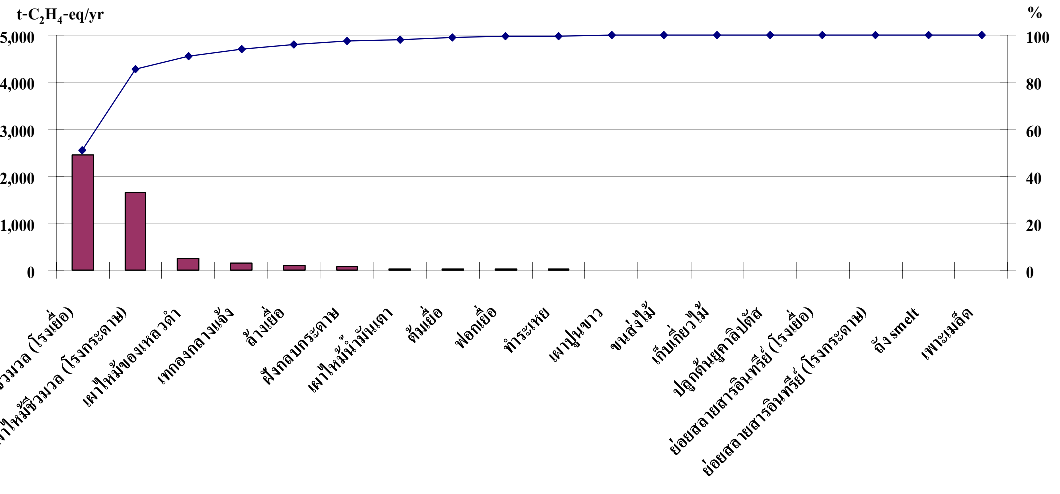
ตารางที่ 3-3 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น (ต่อ)

กิจกรรม/มลสาร	**NO_x**		**NO_3**		**N**		**PO_4^{3-}**		**P**		**COD**		**NH_3**		**รวม***	**สัดส่วน (%)**
	t/yr	**t/yr***	**t/yr***	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***	**t/yr**	**t/yr***		
การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน																
1. การผลิตพลังงาน																
-เผาไหม้ชีวมวล	1,261	163.93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	163.93	2.05
2.การผลิตกระดาษ																
-รีดน้ำออก	0	0	0	0	150	63	0	0	50	153	35,000	770	0	0	986	12.31
3.การบำบัดน้ำเสีย																
-เติมธาตุอาหาร	0	0	0	0	0	0	0	0	840	2,570.40	0	0	0	0	2,570.40	32.08
การจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน																
-ฝังกลบ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	765.71	268	268	3.35
รวม	**5,255.20**	**683.18**	**371.56**	**37.16**	**302**	**126.84**	**211**	**211**	**1,818**	**5,563.08**	**51,000**	**1,122**	**765.71**	**268**	**8,011.25**	**100**

หมายเหตุ * คือ t- PO_4^{3-}-eq/yr

3.1.4 สภาวะหมอกควันพิษ (Smog)

จากการศึกษาในครั้งนี้พิจารณามลสารที่มีส่วนในการก่อให้เกิดสภาวะหมอกควันพิษ ได้แก่ NMVOC NO_x CO และ CH_4 ซึ่งมลสารทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมถูกคิดให้อยู่ในหน่วยของ t-C_2H_4-eq หรือ (t-Ehtylene-eq) จากการประเมิน พบว่า ประมาณร้อยละ 60 ของการปล่อยมลสารทั้งหมดในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ เกิดจากระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ โดยกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดมลพิษมากที่สุด คือ กิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อผลิตพลังงานภายใต้การผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการคราฟท์ ซึ่งปลดปล่อยมลสาร CO (Carbon Monoxide) ออกสู่สิ่งแวดล้อม คิดเป็น 2,006 t-C_2H_4-eq/ปี ในขณะที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่ออบกระดาษในระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ปลดปล่อยมลสาร CO เท่ากับ 1,362 t-C_2H_4-eq/ปี นอกจากนี้ NMVOC (Non Methane Volatile Organic Compound) เท่ากับ 386 t-C_2H_4-eq/ปี และ 262 t-C_2H_4-eq/ปี ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัส และกระบวนการผลิตกระดาษ ก็เป็นส่วนหนึ่งที่มีผลต่อการเกิผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษรวมอยู่ในร้อยละ 80 ดังภาพประกอบที่ 3-5 สำหรับระบบย่อยการกำจัดกระดาษพิมพ์เขียน และระบบย่อยการผลิตยูคาลิปตัส แม้ว่าจะมีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ แต่ก็เกิดขึ้นในสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัส และระบบย่อยการผลผิตกระดาษพิมพ์เขียน ในการเกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษทั้งหมด ดังตารางที่ 3-4



ภาพประกอบที่ 3-5 สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ

ตารางที่ 3-4 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ

กิจกรรม/มลสาร	NMVOC		CO		CH_4		NO_x		รวม	สัดส่วน
	t/yr	$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr	t/yr	$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr	t/yr	$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr	t/yr	$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr	$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr	(%)
การปลูกยูคาลิปตัส										
1.การใช้ปุ๋ย										
-เพาะเมล็ด	0	0	0	0	0	0	0.17	0.0046	0.0046	0.0001
-ปลูกต้นยูคาฯ	0	0	0	0	0	0	26.38	0.74	0.74	0.015
2.การใช้น้ำมัน										
-เก็บเกี่ยว	4.52	1.88	10.43	0.28	4.80	0.03	34.76	0.97	3.16	0.07
-การขนส่งไม้	9.59	3.99	28.56	0.77	0.41	0.0024	60.79	1.70	6.46	0.13
การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์										
1.การผลิตเยื่อ										
-ต้มเยื่อ	80	33.28	0	0	0	0	0	0	33.28	0.69
-ล้างเยื่อ	216	89.86	0	0	0	0	0	0	89.86	1.87
-ฟอกเยื่อ	40	16.64	0	0	0	0	0	0	16.64	0.35
2.การผลิตพลังงาน										
-เผาไหม้ชีวมวล	929	386.38	74,304	2,006.21	557	3.34	1,858	52.01	2,447.95	51.03

ตารางที่ 3-4 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ (ต่อ)

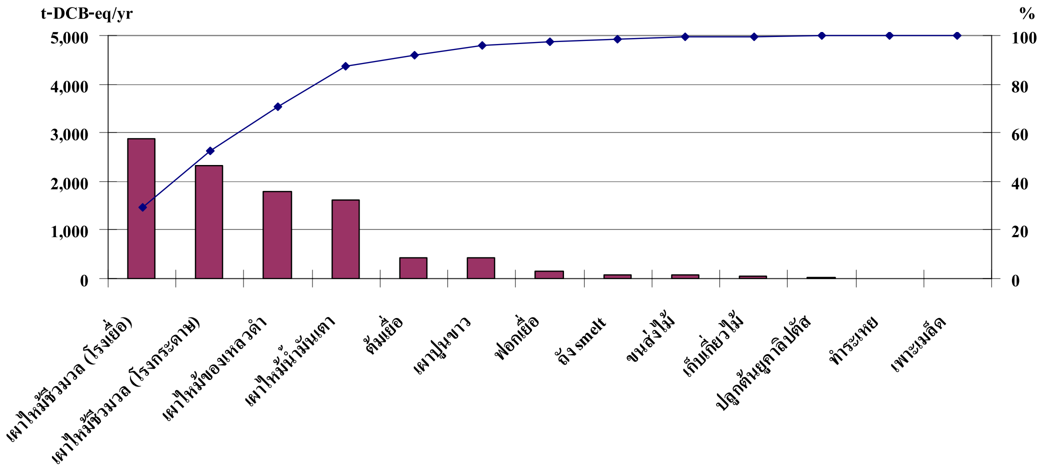
กิจกรรม/มลสาร	**NMVOC**		**CO**		**CH_4**		**NO_x**		**รวม**	**สัดส่วน**
	t/yr	**$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr**	**t/yr**	**$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr**	**t/yr**	**$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr**	**t/yr**	**$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr**	**$t\text{-}C_2H_4$-eq/yr**	**(%)**
3. การนำกลับสารเคมี										
-ถังทำระเหย	40	16.64	0	0	0	0	0	0	16.64	0.35
-เผาไหม้ของเหลวดำ	265.60	110.49	4,400	118.80	0	0	824	23.07	252.36	5.26
-ถัง smelt	0	0	0	0	0	0	8	0.22	0.22	0.005
-เผาปูนขาว	0	0	0	0	0	0	264	7.39	7.39	0.15
-เผาไหม้น้ำมันเตา	22.96	9.55	45.93	1.24	9.19	0.06	918.51	25.72	35.33	0.74
4.การบำบัดน้ำเสีย										
-ย่อยสลายทางชีวภาพ	0	0	0	0	69	0.41	0	0	0.41	0.01
การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน										
1.การผลิตพลังงาน										
-เผาไหม้ชีวมวล	630.50	262.29	50,440.00	1,361.88	378.30	2.27	1,261	35.31	1,661.75	34.64
2.การบำบัดน้ำเสีย										
-ย่อยสลายทางชีวภาพ	0	0	0	0	48.10	0.29	0	0	0.29	0.01

ตารางที่ 3-4 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ (ต่อ)

กิจกรรม/มลสาร	**NMVOC**		**CO**		**CH_4**		**NO_x**		**รวม**	**สัดส่วน**
	t/yr	**$t\text{-}C_2H_4\text{-}eq/yr$**	**t/yr**	**$t\text{-}C_2H_4\text{-}eq/yr$**	**t/yr**	**$t\text{-}C_2H_4\text{-}eq/yr$**	**t/yr**	**$t\text{-}C_2H_4\text{-}eq/yr$**	**$t\text{-}C_2H_4\text{-}eq/yr$**	**(%)**
การจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน										
-ฝังกลบ	0	0	0	0	11,878.16	71.27	0	0	71.27	1.49
-เทกองกลางแจ้ง	0	0	0	0	25,275.54	151.65	0	0	151.65	3.16
รวม	**2,237.97**	**931.00**	**129,228.91**	**3,489.18**	**38,220.78**	**229.32**	**5,255.20**	**147.15**	**4,796.65**	**100**

3.1.5 ความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Toxicity)

ปริมาณการปลดปล่อยมลสารทั้งหมดที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้รวมมลสาร AOX NO_x TRS SO_2 และฝุ่นละออง ซึ่งคิดคำนวณให้อยู่ในรูป t-DCB-eq หรือ (t-$C_6H_4Cl_2$-eq) จากการศึกษา พบว่า ระบบย่อยการผลิตเยื่อคราฟท์ปลดปล่อยมลสารซึ่งส่งผลต่อการเกิดผลกระทบมาเป็นอันดับ 1 ร้อยละ 75 ของการเกิดผลกระทบความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ทั้งหมด โดยปลดปล่อยมลสาร NO_x มากที่สุดร้อยละ 23 ของการปลดปล่อยมลสาร NO_x ทั้งหมดที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงาน ในขณะที่การเผาไหม้น้ำมันเตาก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสาร NO_x เท่ากับ 1,102 t-DCB-eq/ปี ส่วนกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจากกระบวนการผลิตกระดาษปลดปล่อยมลสาร NO_x เท่ากับ 1,513 t-DCB-eq/ปี นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลยังมีผลก่อให้เกิดฝุ่นละออง (Particulates) คิดเป็นร้อยละ 8 สำหรับการเผาไหม้ในระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัส และคิดเป็นร้อยละ 7 สำหรับการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ส่วนการเผาไหม้ของเหลวดำซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงอย่างหนึ่งในหม้อต้มไอน้ำนำกลับคืนสารเคมีของหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีในระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์มีผลต่อการเกิดฝุ่นละอองคิดเป็นร้อยละ 8 ซึ่งจัดรวมอยู่ในร้อยละ 80 ของมลสารที่เกิดขึ้น และส่งผลกระทบต่อสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ดังภาพประกอบที่ 3-6 สำหรับระบบย่อยการปลูกยูคาลิปตัสสัดส่วนการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2 ของการเกิดผลกระทบนี้ ส่วนระบบย่อยการกำจัดกระดาษพิมพ์เขียนไม่ก่อให้เกิดมลสารที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ จากการพิจารณามลสารต่างๆ ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ ดังตารางที่ 3-5



ภาพประกอบที่ 3-6 สัดส่วนของกิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภทสรุปได้ ดังตารางที่ 3-6 ซึ่งมลสารต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท ถูกเปลี่ยนหน่วยเทียบเท่า ให้อยู่ในหน่วยเทียบเท่าเดียวกันทั้งหมด ในแต่ละประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อม ค่าที่ได้จากตารางถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าผลกระทบปกติ (Normalized Effect Score) และค่าผลกระทบรวม (Overall หรือ Overall) ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตในประเทศไทย เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละประเภท และรวมผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นค่าเดียว

ตารางที่ 3-5 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

กิจกรรม/มลสาร	**AOX**		**TRS**		**SO_2**		**NO_x**		**Particulates**		**รวม**	**สัดส่วน (%)**
	t/yr	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t-DCB-eq/yr**	
การปลูกยูคาลิปตัส												
1.การใช้ปุ๋ย												
-เพาะเมล็ด	0	0	0	0	0	0	0.17	0.20	0	0	0.20	0.002
-ปลูกยูคาลิปตัส	0	0	0	0	0	0	26.38	31.65	0	0	31.65	0.32
2.การใช้น้ำมัน												
-เก็บเกี่ยว	0	0	0	0	0	0	34.76	41.71	0	0	41.71	0.42
-ขนส่งไม้ยูคาลิปตัส	0	0	0	0	40.80	3.92	60.79	72.95	0	0	76.87	0.78
การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์												
1.การผลิตเยื่อ												
-ต้มเยื่อ	0	0	2,000	440	0	0	0	0	0	0	440	4.45
-ฟอกเยื่อ	160	160	0	0	0	0	0	0	0	0	160	1.62
2.การผลิตพลังงาน												
-เผาไหม้ชีวมวล	0	0	0	0	0	0	1,857.60	2,229.12	800	656	2,885.12	29.16

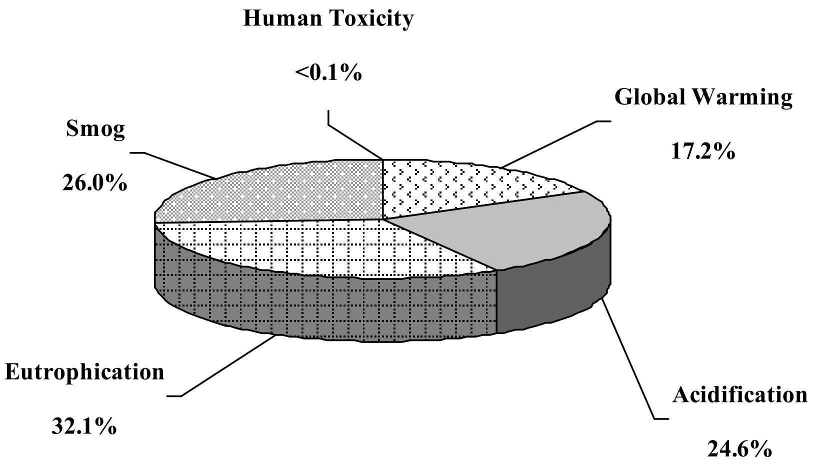
ตารางที่ 3-5 มลสารจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (ต่อ)

กิจกรรม/มลสาร	**AOX**		**TRS**		**SO_2**		**NO_x**		**Particulates**		**รวม**	**สัดส่วน**
	t/yr	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**t-DCB-eq/yr**	**(%)**
3.การนำกลับสารเคมี												
-ถังทำระเหย	0	0	0.80	0.18	0	0	0	0	0	0	0.18	0.002
-เผาไหม้ของเหลวดำ	0	0	2.40	0.53	160	15.36	824	988.80	960	787.20	1,791.89	18.11
-ถัง smelt	0	0	7.20	1.58	24	2.30	8	9.60	80	65.60	79.09	0.80
-เผาปูนขาว	0	0	0	0	440	42.24	264	316.80	80	65.60	424.64	4.29
-เผาไหม้น้ำมันเตา	0	0	0	0	5,483.52	526.42	918.51	1,102.21	0	0	1,628.63	16.46
การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน												
1.การผลิตพลังงาน												
-เผาไหม้ชีวมวล	0	0	0	0	0	0	1,261	1,513.20	1,000	820	2,333.20	23.58
รวม	**160**	**160**	**2,010.40**	**442.29**	**6,148.32**	**590.24**	**5,255.20**	**6,306.24**	**2,920**	**2,394.40**	**9,893.17**	**100**

ตารางที่ 3-6 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น (Effect Score) ในแต่ละประเภทของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

ประเภทผลกระทบ	มลสาร	ผลกระทบ (Effect Score)	หน่วย
สภาวะโลกร้อน	CO_2	427,673	ton-CO_2/year
	CH_4	879,078	ton-CO_2/year
	N_2O	49,606	ton-CO_2/year
สภาวะฝนกรด	SO_2	6,148	ton-SO_2/year
	NO_x	3,731	ton-SO_2/year
	NH_3	1,440	ton-SO_2/year
	TRS	3,780	ton-SO_2/year
สภาวะยูโทรฟิเคชั่น	PO_4^{3-}	211	ton-PO_4^{3-}/year
	NO_x	683	ton-PO_4^{3-}/year
	NO_3	37	ton-PO_4^{3-}/year
	N	127	ton-PO_4^{3-}/year
	P	5,563	ton-PO_4^{3-}/year
	COD	1,122	ton-PO_4^{3-}/year
	NH_3	268	ton-PO_4^{3-}/year
สภาวะหมอกควันพิษ	NMVOC	931	ton-C_2H_4/year
	CO	3,489	ton-C_2H_4/year
	CH_4	229	ton-C_2H_4/year
	NO_x	147	ton-C_2H_4/year
สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์	AOX	160	ton-DCB/year
	TRS	442	ton-DCB/year
	SO_2	590	ton-DCB/year
	NO_x	6,306	ton-DCB/year
	Particulates	2,394	ton-DCB/year

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ภายใต้วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนจากกรณีอ้างอิง จากตารางที่ 3-6 ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) เท่ากับ 1.92E-04 (0.000192) มลสารที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเหล่านี้ถูกคัดเลือก และรวบรวม เพื่อนำไปศึกษาเป็นแนวทางในการศึกษาหาทางเลือกสำหรับใช้ในการลดมลสารชนิดต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกิจกรรมต่างๆ ต่อไป ผลกระทบที่เกิดขึ้นมากที่สุดจากการประเมิน คือ ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น รองลงมา คือ สภาวะหมอกควันพิษ สภาวะฝนกรด สภาวะโลกร้อน และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 3-7 ดังนั้น ทางเลือกที่นำมาพิจารณาส่วนใหญ่จึงมีผลต่อการลดมลสารต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบ ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น สภาวะหมอกควันพิษ สภาวะฝนกรด สภาวะโลกร้อน และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 3-7 สัดส่วนของค่าผลกระทบปกติ (Normalized Effect Score) ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

3.2 ผลการประเมินระดับกิจกรรม (Result of Activity Level Assessment)

ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 5 ประเภทที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.1 มลสารที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดไปจนถึงน้อยที่สุดที่รวมกันได้ร้อยละ 80 ในแต่ละประเภทจะถูกคัดเลือก เพื่อนำไปศึกษาทางเลือก และใช้เป็นแนวทางในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการปลดปล่อยมลสาร ดังตารางที่ 3-7 โดยกิจกรรมหนึ่งกิจกรรมอาจปลดปล่อยมลสารออกสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่าหนึ่งชนิด ในขณะที่มลสารเพียงชนิดเดียวที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งก็สามารถก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าหนึ่งผลกระทบได้

ตารางที่ 3-7 สัดส่วนของมลสารจากกิจกรรมต่างๆ (Effect Score) ที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบแต่ละประเภท

ประเภทผลกระทบ	มลสาร	กิจกรรม	สัดส่วนค่าการ* ปลดปล่อยมลพิษ (%)	สะสม
สภาวะโลกร้อน	CH_4	เทกองกลางแจ้ง	43	43
	CO_2	เผาไหม้น้ำมันเตา	26	69
	CH_4	ฝังกลบ	20	89
สภาวะฝนกรด	SO_2	เผาไหม้น้ำมันเตา	36	36
	TRS	ต้มเยื่อ	25	61
	NH_3	ฝังกลบ	10	71
	NO_x	เผาไหม้ชีวมวล (โรงเยื่อ)	9	80
สภาวะยูโทรฟิเคชั่น	P	เติมธาตุอาหารแก่จุลินทรีย์ (โรงกระดาษ)	32	32
	P	เติมธาตุอาหารแก่จุลินทรีย์ (โรงเยื่อ)	26	58
	P	การฟอกเยื่อ	10	68
	COD	รีดน้ำออก	10	78
	NH_3	ฝังกลบ	3	81

ตารางที่ 3-7 สัดส่วนของมลสารจากกิจกรรมต่างๆ (Effect Score) ที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบแต่ละประเภท (ต่อ)

ประเภทผลกระทบ	มลสาร	กิจกรรม	สัดส่วนค่าการ* ปลดปล่อยมลพิษ (%)	สะสม
สภาวะหมอกควันพิษ	CO	เผาไหม้ชีวมวล (โรงเยื่อ)	42	42
	CO	เผาไหม้ชีวมวล (โรงกระดาษ)	28	70
	NMVOC	เผาไหม้ชีวมวล (โรงเยื่อ)	8	78
	NMVOC	เผาไหม้ชีวมวล (โรงกระดาษ)	5	83
สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์	NO_x	เผาไหม้ชีวมวล (โรงเยื่อ)	23	23
	NO_x	เผาไหม้ชีวมวล (โรงกระดาษ)	16	39
	NO_x	เผาไหม้น้ำมันเตา	11	50
	NO_x	เผาไหม้ของเหลวดำ	10	60
	Particulates	เผาไหม้ชีวมวล (โรงกระดาษ)	8	68
	Particulates	เผาไหม้ของเหลวดำ	8	76
	Particulates	เผาไหม้ชีวมวล (โรงเยื่อ)	7	83

หมายเหตุ * สัดส่วนมลสารที่นำมาใช้ในการคำนวณเป็นค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Effect Score)

มลสารที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมต่างๆ 9 กิจกรรม ซึ่งรวมกันมากกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 80 จากกิจกรรมทั้งหมดในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ถูกนำมาเป็นขอบเขตเพื่อใช้ในการศึกษาทางเลือก และนำไปใช้ลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยกิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ คือ

- กิจกรรมการต้มเยื่อ
- กิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (โรงเยื่อ และโรงกระดาษ)
- กิจกรรมเผาไหม้ของเหลวดำ
- กิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา
- กิจกรรมการรีดน้ำออก
- กิจกรรมการฟอกเยื่อ
- กิจกรรมการบำบัดน้ำเสีย (โรงเยื่อ และโรงกระดาษ)
- กิจกรรมการฝังกลบ
- กิจกรรมเทกองกลางแจ้ง

ทางเลือกที่ศึกษา และนำมาใช้ในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้น เป็นทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ได้จริงในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ทางเลือกที่นำมาใช้แล้วสามารถลดระดับหรือปริมาณการใช้วัตถุดิบในแต่ละกิจกรรม (Activity Level) ซึ่งสามารถนำมาแทนค่า และคำนวณได้ ดังสมการที่ (1-1)

$$A_{\alpha} = [A_{\alpha,ref} \times \prod_{j \in J} [(1 - rf_{\alpha,j})] \qquad (1\text{-}1)$$

สำหรับทางเลือกที่นำมาใช้ และมีผลต่อการลดปริมาณมลสารตัวสำคัญที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมสำคัญ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบนั้น สามารถนำมาแทนค่าได้ดังสมการที่ (1-3) หากทางเลือกที่นำมาใช้ลดมลสารในกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งมีผลข้างเคียงต่อการลด หรือเพิ่มมลสารตัวอื่นจากกิจกรรมเดียวกัน ก็สามารถนำมาแทนค่าลงในสมการได้ทั้งหมด โดยนำสัดส่วนที่ลดลง หรือเพิ่มขึ้นของมลสารชนิดอื่น $[1-(rf_{\varepsilon,\alpha,j})]$ มาคูณแทนค่าลงในสมการ ดังสมการที่ (1-3)

$$E_{\varepsilon,\alpha} = A_{\alpha} \times F_{\varepsilon,\alpha} \times \prod_{j \in J} [(1-(rf_{\varepsilon,\alpha,j})) \times (1-(rf_{\varepsilon,\alpha,j})) \times \ldots] \qquad (1\text{-}3)$$

จากที่ได้กล่าว ทางเลือกที่ศึกษาทั้งหมดในครั้งนี้บางทางเลือกสามารถลดได้ทั้งระดับกิจกรรม และระดับของมลสาร บางทางเลือกก็ลดได้เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง ส่วนผลกระทบข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้นั้นมีทั้งผลกระทบด้านบวก และด้านลบ ด้านบวก คือ เมื่อนำทางเลือกมาใช้เพื่อลดมลสารตัวที่ต้องการลดแล้วในขณะเดียวกันก็สามารถลดมลสารตัวอื่นที่เกิดขึ้นในกิจกรรมนั้นๆ ได้ด้วย สำหรับผลกระทบข้างเคียงด้านลบ คือ เมื่อนำทางเลือกที่ต้องการมาใช้ลดมลสารที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมแล้ว ก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสารตัวอื่นๆ เพิ่มขึ้น ผลกระทบข้างเคียงทั้งด้านบวก และด้านลบที่เกิดขึ้น สามารถนำมาแทนค่าเพื่อประเมินผลกระทบได้ดังสมการที่ (1-3)

ทางเลือกต่างๆ ที่ศึกษา และนำมาใช้เป็นแนวทางในการลดปริมาณการใช้วัตถุดิบ รวมถึงลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ จากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องนั้นถูกนำไปใช้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับใช้เป็นแบบสอบถาม สอบถามทางเลือกจากโรงงาน และนำข้อมูลที่ได้จากสอบถามมาศึกษากรณีปัจจุบัน ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.7 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของผลกระทบที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบผลกระทบกับกรณีศึกษาต่างๆ โดยกรณีอ้างอิงในที่นี้เป็นกรณีที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นมา เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของทางเลือกต่างๆ ที่ได้ศึกษา ซึ่งจำกัดขอบเขตการ

ประเมินที่ 9 กิจกรรมสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้ง 5 ประเภทมากที่สุด จากตารางที่ 3-7 ซึ่งผู้วิจัยจะได้กล่าวต่อไปนี้

3.3 กรณีอ้างอิง (Reference Case)

ประสิทธิภาพของทางเลือกที่ศึกษา และนำมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ในการวิจัยครั้งนี้ คำนวณได้จากกรณีอ้างอิง ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการดูแล ควบคุม และจัดการของเสีย รวมถึงมลพิษต่างๆ จากวัฏจักรชีวิตการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน กรณีดังกล่าวจึงเป็นกรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่จะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.7 ในขณะที่การผลิตกระดาษพิมพ์เขียนในปัจจุบันได้นำทางเลือก รวมถึงเทคนิค และวิธีการต่างๆ มาใช้เพื่อลดการเกิดมลพิษ และของเสียต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม จากการสอบถามจากโรงงาน ทำให้มลสารรวมถึงของเสียต่างๆ ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง ความแตกต่างของกรณีอ้างอิง และกรณีปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 3-8 ผลการประเมินกรณีอ้างอิง พบว่า วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่พิจารณาขอบเขตการประเมินแบ่งเป็น 4 ระบบย่อย ก่อให้เกิดมลสาร รวมถึงของเสียต่างๆ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแตกต่างกันออกไป โดยผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากมลสารที่เกิดขึ้นจากระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ส่วนระบบย่อยการปลูกป่ายูคาลิปตัส มีสัดส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบน้อยมาก เมื่อเทียบกับระบบย่อยอื่นๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่นำมาพิจารณา ดังนั้น รายละเอียดของระบบย่อยดังกล่าว จึงไม่นำมาพิจารณาเพื่อหาทางเลือกในการลดการปลดปล่อยมลสาร ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

ตารางที่ 3-8 ความแตกต่างของกรณีอ้างอิง และกรณีปัจจุบัน

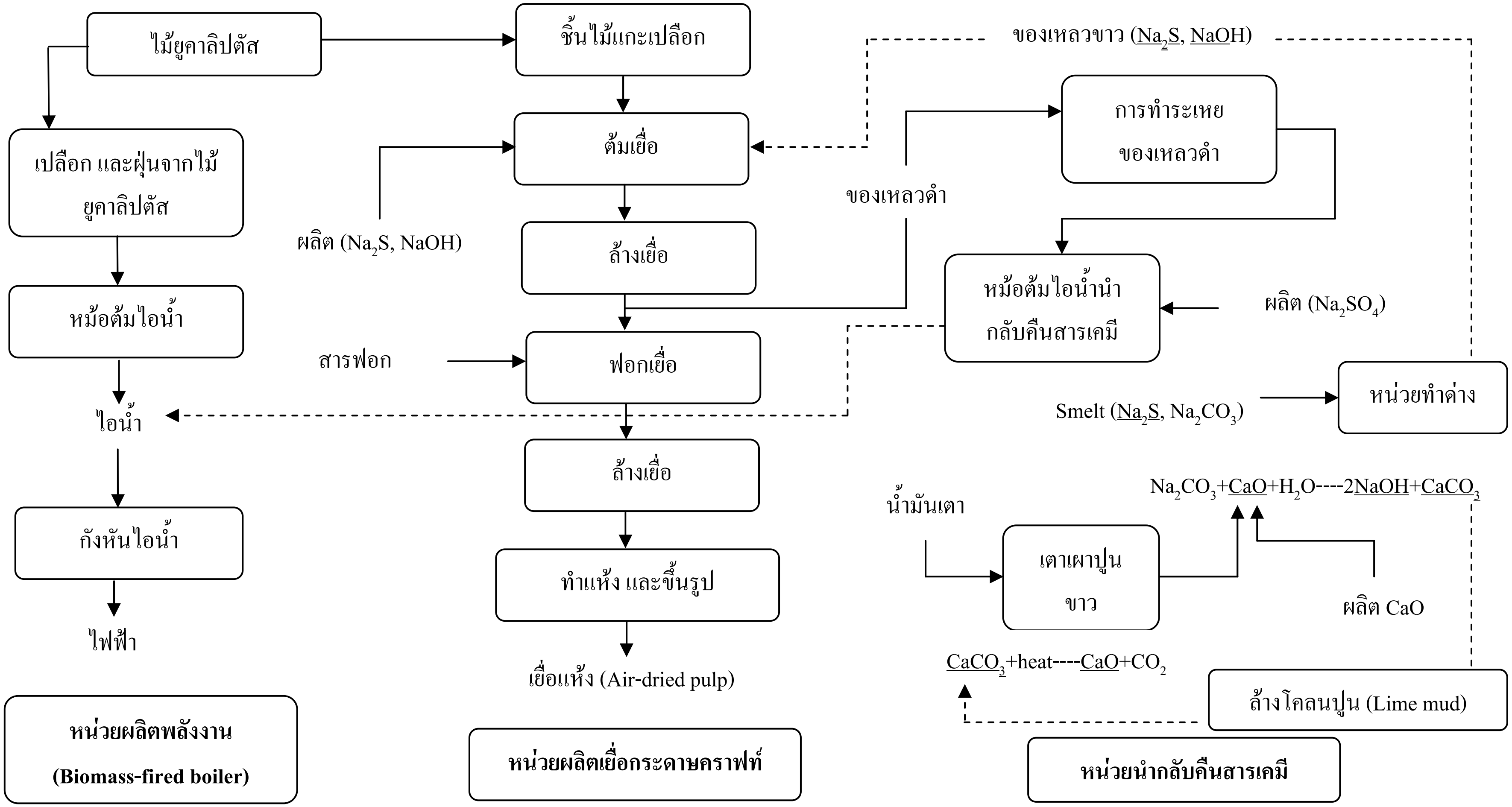
หน่วย	กรณีอ้างอิง (Assumed)	กรณีปัจจุบัน (Actual)
การผลิตเยื่อ		
- ต้มเยื่อ	ไม่มีเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพของการต้มเยื่อ	กำจัดลิกนินโดยใช้ออกซิเจน
- ฟอกเยื่อ	ECF_{light} (1)	D-E_{op}-D-D (1)
การผลิตพลังงาน	Biomass/Co-Generation	Biomass/Co-Generation
นำกลับคืนสารเคมี	ไม่มีควบคุมมลพิษ	มีการควบคุมมลพิษ
บำบัดน้ำเสีย	ไม่มีการควบคุม และบำบัดน้ำเสีย	Activates sludge และ Spill prevention
การผลิตกระดาษ	ไม่มีการควบคุมมลพิษ	มีระบบควบคุมมลพิษ
กำจัดกระดาษ		
- ฝังกลบ	ไม่มีการเก็บรวบรวมและบำบัดก๊าซจากหลุมฝังกลบ	มีระบบรวบรวมและบำบัดก๊าซจากหลุมฝังกลบ

หมายเหตุ (1) Elemental Chlorine Free ระบบการฟอกเยื่อกระดาษที่ใช้สารประกอบคลอรีน เช่น คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) และมีการฟอกหลายขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกใช้ D คือ Chlorine Dioxide (ClO_2) ในการฟอก ต่อมาใช้ E_{op} คือ ใช้ Sodium Hydroxide (NaOH) ร่วมกับ ก๊าซออกซิเจน (O_2) และสารละลาย Hydrogen Peroxide (H_2O_2) เป็นตัวทำปฏิกิริยาในการฟอก

ที่มา : ดัดแปลงจาก Jawjit *et al.* (2006) and Bordado *et al.* (2006)

3.3.1 ระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft Pulp Product Sub-System)

ระบบย่อยการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์แบ่งออกเป็น 4 หน่วย คือ หน่วยการผลิตเยื่อ หน่วยการผลิตพลังงาน หน่วยการนำกลับคืนสารเคมี และหน่วยการบำบัดน้ำเสีย แสดงรายละเอียดกรณีแสดงดังภาพประกอบที่ 3-8 การผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ จะต้องนำไม้ที่เข้าสู่โรงงานมาสับเป็นชิ้นเล็กๆ ผ่านการทำความสะอาดก่อนแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการต้มชิ้นไม้เล็กๆ ให้กลายเป็นเยื่อนุ่มๆ โดยใช้สารเคมีเป็นตัวช่วยย่อยองค์ประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในเนื้อไม้ สารเคมีที่ใช้ในการต้มเหล่านี้สามารถนำเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืนสารเคมี เพื่อนำกลับมาใช้ในการต้มได้ ซึ่งสารเคมี และสารอินทรีย์ในเนื้อไม้ดังกล่าวอยู่ในรูปของของเหลว เรียกว่า ของเหลวดำ (Black Liquor) ขั้นตอนการต้มเยื่อทำเพื่อกำจัดลิกนิน (Lignin) ออกจากเนื้อไม้ เพิ่มประสิทธิภาพการฟอกที่ดีมากขึ้น เนื่องจาก ลิกนินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของไม้มีคุณสมบัติทำให้เนื้อไม้แข็ง การต้มจะใช้ Sodium Sulfide (Na_2S) and Sodium Hydroxide (NaOH) เป็นสารเคมีช่วยในการย่อยเนื้อไม้ในกระบวนการคราฟท์ (Heminway, 1995) ซึ่งในที่นี้อ้างอิงกรณีว่าไม่มีเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้มเพื่อกำจัดลิกนินออก หลังจากนั้น จึงนำเยื่อที่ต้มแล้วมาทำความสะอาดอีกครั้งก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการฟอกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเยื่อให้มีความขาวมากขึ้น วิธีการฟอกที่ใช้ คือ D-E_{op}-D-D (D = Chlorine Dioxide (ClO_2) , E_{op} = ใช้ Sodium Hydroxide (NaOH) ร่วมกับ ก๊าซออกซิเจน (O_2) และสารละลาย Hydrogen Peroxide (H_2O_2) เป็นตัวทำปฏิกิริยา) (Sakurai, 1995) ต่อมาก็เข้าสู่ขั้นตอนการฟอกเยื่อจะถูกล้างอีกครั้งก่อนเข้ากระบวนการทำให้แห้ง หรือทำแผ่นเพื่อผลิตกระดาษต่อไป น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเยื่อจากกรณีอ้างอิง จะไม่มีการควบคุมและวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น เมื่อไม่มีการดูแล ควบคุม และบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงทำให้เกิดปริมาณน้ำเสียเป็นจำนวนมาก รวมถึงมลพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียอีกจำนวนมาก จึงทำให้มลพิษต่างๆ เหล่านี้ไม่ได้รับการบำบัด หรือกำจัดก่อนถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามมา



ภาพประกอบที่ 3-8 หน่วยการผลิตไฟฟ้า และหน่วยนำกลับคืนสารเคมีของระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Jawjit (2006)

สำหรับหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีที่ใช้กันในโรงงานผลิตเยื่อโดยทั่วไป ของเหลวดำซึ่งได้จากการต้มเยื่อ (Pulp Cooking หรือ Digesting) ถูกทำระเหย (Evaporation) เพื่อลดปริมาณน้ำและเพิ่มปริมาตรสารเคมีในการนำกลับไปใช้ใหม่ เมื่อของเหลวผ่านการทำระเหยแล้วจะเข้าสู่กระบวนการต้ม ของเหลวที่ถูกหลอมเหลวจะกลายเป็นสีเขียว เรียกว่า ของเหลวเขียว (Green Liquor) ซึ่งประกอบไปด้วย Sodium Sulfide (Na_2S) และ Sodium Carbonate (Na_2CO_3) โดย Na_2S จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ได้เลย ส่วน Na_2CO_3 จะต้องผ่านขั้นตอนการทำด่าง (Causticizer) เพื่อผลิต NaOH กลับไปใช้ในการต้มเยื่อต่อไป การได้มาซึ่ง NaOH จะต้องมีการผลิต CaO เพื่อนำมารวมตัวกับ Na_2CO_3 ให้ได้เป็น NaOH ดังสมการเคมี (3-1) ซึ่งโคลนปูน (Lime Mud) หรือ Calcium Carbonate ($CaCo_3$) จะถูกเผาร่วมกันกับ Lime ใน Causticizer เพื่อผลิต CaO ดังสมการเคมี (3-2) และ $CaCO_3$ สามารถนำกลับมาใช้เพื่อการผลิต CaO ได้ สำหรับเชื้อเพลิงในการเผาใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาปูนขาว (Lime Kiln) ขั้นตอนการนำกลับคืนสารเคมีแสดงรายละเอียดดังภาพประกอบที่ 3-8 ประสิทธิภาพการนำกลับคืนสารเคมีของกระบวนการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์มีประมาณร้อยละ 60-90 (DIW, 1999 and ERIC and TPPIA, 2002) ซึ่งจากขั้นตอนการนำกลับสารเคมีในระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ดังกล่าวนี้ อ้างอิงกรณีที่เกิดขึ้น ไม่มีระบบควบคุมมลพิษที่เกิดขึ้นทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นในส่วนของหม้อต้มสารเคมี ส่วนของการทำระเหย หรือในส่วนของเตาเผา ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า มลพิษที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ผ่านการควบคุมใดๆ

$$Na_2CO_3 + CaO + H_2O \rightarrow 2NaOH + CaCO_3 \quad (3\text{-}4)$$

$$CaCO_3 + heat \rightarrow CaO + CO_2 \quad (3\text{-}5)$$

ในส่วนของหน่วยผลิตพลังงานกระบวนการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์ ต้องการพลังงานที่นำมาใช้ในการผลิตเป็นจำนวนมาก แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถการผลิตพลังงานไอน้ำและพลังงานไฟฟ้าภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อ และใช้หม้อต้ม (Boiler) เป็นตัวผลิตพลังงานความร้อนซึ่งมีเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตพลังงาน จากภาพประกอบที่ 3-8 โดยร้อยละ 50 ของไม้ยูคาลิปตัสที่เข้ามาเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อ ก่อให้เกิดเปลือกไม้ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มเพื่อการผลิตพลังงานได้ (EC, 2001) และพลังงานที่ใช้ในการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ประมาณร้อยละ 90 ของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตทั้งหมด มาจากการผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อดังกล่าว (ERIC and TPPIA, 2002) ดังนั้น จึงทำให้หน่วยการผลิตพลังงานเป็นหน่วยที่มีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตเยื่อยูคา

ลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ และในการศึกษาครั้งนี้ ไม่นำการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งผลิตจากโรงไฟฟ้าภายนอกมาใช้ในการพิจารณา เนื่องจากไฟฟ้าจากภายนอกที่นำมาใช้ มีเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับไฟฟ้าที่ใช้จากการผลิตภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์เอง ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลของหม้อต้ม ในกรณีดังกล่าวไม่มีการควบคุมใดๆ จึงก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษชนิดต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม และอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาได้

3.3.2 ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Printing and Writing Paper Production Sub-System)

กระบวนการผลิตกระดาษ เป็นกระบวนการต่อจากการผลิตเยื่อ โดยเยื่อที่ได้จะถูกนำมาขึ้นรูปเพื่อนทำเป็นแผ่นกระดาษ หลังจากขั้นตอนการขึ้นรูปกลายเป็นแผ่นกระดาษแล้ว จะถูกฉาบด้วยสารเคมีเพื่อความเรียบลื่น ความเหนียว และความสว่างของกระดาษโดยสารเคมีที่ใช้ คือ น้ำแป้งและน้ำปูนขาว เมื่อแผ่นกระดาษถูกฉาบด้วยสารเคลือบแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการดูดน้ำออกจากกระดาษ แล้วผ่านไปยัง ขั้นตอนการกดเอาน้ำออก และกดเพื่อให้กระดาษแน่น ต่อมาจึงมาสู่การซับน้ำออกจากแผ่นกระดาษอีกครั้ง และขั้นตอนการทำให้กระดาษแห้งขั้นสุดท้าย คือ ขั้นตอนการอบกระดาษ เพื่อปรับคุณสมบัติของกระดาษให้มีความแห้งมากที่สุด ก่อนการเข้าม้วนกระดาษโดยอาศัยความร้อนจาก Biomass Boiler ซึ่งใช้เปลือกไม้ และเศษไม้จากการผลิตเยื่อมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งหม้อต้มดังกล่าว ไม่มีการควบคุม หรือบำบัดก๊าซเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม กระดาษส่วนหนึ่งจะเข้าสู่ม้วนใหญ่เพื่อส่งขาย และอีกส่วนจะเข้าสู่ม้วนเล็กเพื่อผลิตกระดาษขนาดต่างๆ และถูกตัดเป็นแผ่น ที่เรียกกันว่า กระดาษ A4 เพื่อบรรจุห่อ และส่งขายต่อไป ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระดาษ เมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อมีมากกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำส่วนใหญ่ จะถูกเอาออกจากกระดาษจนแห้งเพื่อผลิตเป็นแผ่นกระดาษที่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยน้ำเสียออกมาในปริมาณที่มาก สำหรับการจัดการน้ำเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงานนั้น ผู้วิจัยอ้างอิงกรณีโดยไม่มีการควบคุม หรือจัดการน้ำเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมนั้น อาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาภายหลังได้

3.3.3 ระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน (Paper Disposal Sub-System)

สำหรับการกำจัดกระดาษขั้นสุดท้ายแบ่งการกำจัดออกเป็น 3 วิธี คือ การฝังกลบ (Landfill) โดยอ้างอิงกรณีว่าไม่มีการดูแล เก็บรวบรวมก๊าซ และบำบัดก๊าซที่เกิดขึ้นจากการฝังกลบ วิธีกำจัดที่ 2 คือ การเผา (Incineration) กระดาษการเผากระดาษไม่มีการควบคุมมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผา และสุดท้ายการเทกองกลางแจ้ง (Open Dump) มลพิษที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายโดยทั่วไปไม่มีการจัดการที่ดี และในที่นี้สถานการอ้างอิงจึงไม่มีการควบคุมก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเทกองกลางแจ้ง จึงทำให้ก๊าซ และมลพิษที่เกิดขึ้นจากการกำจัดขยะกระดาษมากมาย นำมาซึ่งการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมที่ขาดการควบคุม ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา

จากกรณีอ้างอิงที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกรณีอ้างอิงที่นำมาใช้ประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกรณีที่ไม่มีการควบคุม ไม่มีการจัดการ หรือนำเทคนิคใดๆ มาใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน เพื่อลดการเกิดมลสารชนิดต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการประเมินภายใต้กรณีอ้างอิงดังกล่าว จะนำมาสู่การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในการลดมลสารชนิดต่างๆ ซึ่งในที่นี้มลสารชนิดต่างๆ ที่ถูกคัดเลือกมาพิจารณานั้น มาจากสัดส่วนที่รวมกันได้ร้อยละ 80 ในแต่ละประเภทผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3 ทางเลือกต่างๆ ที่ผู้วิจัยได้ศึกษา และนำมาใช้เป็นแนวทางในการจัดการเพื่อลดมลสารชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมภายใต้ขอบเขตที่พิจารณาของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

3.4 ทางเลือกเพื่อลดมลพิษ (Options for Emission Reduction)

3.4.1 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการต้มเยื่อ (Pulp Cooking)

จากกรณีศึกษาที่พิจารณา พบว่า TRS (Total Reduce Sulfur) เป็นมลสารตัวหลัก และรวมอยู่ในร้อยละ 80 ของผลกระทบการเกิดสภาวะฝนกรดจึงนำมาพิจารณา และศึกษาทางเลือกในการลด TRS ที่เกิดขึ้น ทางเลือกที่ศึกษา และนำมาใช้มีดังนี้

3.4.1.1 กำจัด TRS โดยใช้ Stripping Column (Condensate Stripping) เป็นวิธีการแยกสารประกอบ TRS ที่เจือปนอยู่ในอากาศ หรือของเหลว โดยการผ่านช่องแยก (Stripping Column) ซึ่งมีสารละลายตัวแยก (Stripping Solvent) คอยจับ TRS เครื่องมือดังกล่าวสามารถใช้ร่วมกับการทำระเหยได้ และลด TRS ได้ร้อยละ 90 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.9$) (Hynninen, 1998 and Bordado and Gomes, 2002)

3.4.1.2 นำกลับคืนของเหลวขาวร่วมกับ NaOH Scrubber (White Liquor and NaOH Scrubber) เป็นการนำ Scrubber มาใช้ร่วมกันกับขั้นตอนการนำกลับคืนสารเคมี เพื่อลด TRS โดยภายใต้กระบวนการนำกลับคืนสารเคมีนั้น จะมีกิจกรรมการทำระเหยของของเหลวดำอยู่ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวสามารถช่วยลด TRS ได้ เนื่องจาก Sodium (Na) จะถูกระเหย และทำปฏิกิริยากับ sulfur (S) ในระหว่างการทำระเหยส่งผลให้ SO_2 และ TRS ลดลงได้ หลังจากนั้น TRS ที่ยังหลงเหลืออยู่จะถูก Sodium Hydroxide ที่นำมาใช้เป็นสารละลายใน Scrubber เพื่อดักจับ TRS ในกระแสก๊าซจะถูกกำจัดออกไปอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากในการกำจัดตอนแรกนั้น TRS อาจไม่หมดไปเพราะอุณหภูมิ และความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่มีอยู่ จึงต้องใช้ Sodium Hydroxide Scrubber อีกครั้งซึ่งผลที่ได้ คือ TRS จะลดลงได้ประมาณร้อยละ 99 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.99$) (Faustino (Tino) Prado,P.E, 2003) นอกจากนี้ข้อดีของการนำ Scrubber มาใช้ คือ มีค่าใช้จ่าย และการดำเนินงานที่ต่ำจึงไม่ต้องใช้เงินลงทุนสูงมากนัก (Faustino (Tino) Prado,P.E, 2003)

3.4.1.3 ควบคุมสภาวะหม้อต้มเยื่อ (PTP และ AQ) เป็นวิธีการลด TRS ภายในหม้อต้มเยื่อ ซึ่งควบคุมสภาวะของการต้มเยื่อ (Phase Transition Cooking: PTC) ที่จุดเปลี่ยน (Phase transition point: PTP) จาก Sulfur กลายเป็น Sulfide ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งใช้ Anthraquinone (AQ) เป็นสารตัวเร่ง (catalytic) ทำให้ลดการเกิด TRS ได้ร้อยละ 40 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.4$) (Yoon *et al.,* 2001)

3.4.1.4 ใช้ Activated Carbon เป็นตัวดูดซับ (Activated Carbon Absorption) เป็นเทคโนโลยีการดูดซับกลิ่นด้วยตัวดูดซับ ซึ่งกลิ่น หรือ TRS จะถูกดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ระบบนี้ใช้เสริมการกำจัดกลิ่นร่วมกับระบบอื่นๆ (นพภาพร และคณะ, 2547) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากถึงร้อยละ 99 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.99$) (Faustino (Tino) Prado,P.E, 2003) แต่ผงถ่านดังกล่าวมีราคาค่อนข้างแพง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผู้ประกอบการ เลือกที่จะใช้วิธีการลด TRS แบบอื่นก่อน เช่น การนำ Scrubber มาใช้ก่อน แทนที่จะใช้ถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียวซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้ (Faustino (Tino) Prado,P.E, 2003)

3.4.2. ทางเลือกในการลดมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Combustion)

มลสารจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ประกอบด้วย CO NO_x NMVOC และ ฝุ่นละออง (Particulates) มลสารต่างๆ เหล่านี้จัดอยู่ในสัดส่วนร้อยละ 80 ของการเกิดผลกระทบโลกร้อน สภาวะฝนกรด สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ทางเลือกที่นำมาใช้ เพื่อลดมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล มีดังนี้

3.4.2.1 ใช้ก๊าซธรรมชาติแทนที่ชีวมวล (Natural Gas Replacing Biomass) คือ การแทนที่เชื้อเพลิงชีวมวล (เปลือกไม้ และเศษชิ้นไม้ยูคาลิปตัส) ด้วยก๊าซธรรมชาติ เพื่อใช้ในการผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์ และอบกระดาษในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งสามารถแทนที่การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลได้ทั้งหมด ($rf_{\alpha} = 1$) (IPCC, 1997) โดยการนำ Fossil Fuel มาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นผลให้ลดการเกิดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลได้ ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 1$) (IPCC, 1997)

3.4.2.2 ระบบความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Thermal Systems) คือ การนำแผ่นพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) มาใช้ เพื่อผลิตพลังงานความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส วิธีการดังกล่าวสามารถใช้แทนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกับหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) ได้ร้อยละ 10 ($rf_{\alpha} = 0.1$) (UNEP, 2005)

3.4.2.3 ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Thermal Electricity) คือ การนำแผ่นพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) มาใช้เพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าทดแทนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเผาในหม้อต้มไอน้ำ (boiler) ได้ทั้งหมด ($rf_{\alpha} = 1$) อีกทั้งยังลดการเกิดฝุ่นละออง ได้ทั้งหมดด้วย ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 1$) (UNEP, 2005)

3.4.2.4 Biomass Gasification Combined Cycle: BIGCC คือ การผลิตพลังงานที่ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง วิธีการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ BIGCC คือ การเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็งในที่นี้ คือ เศษชิ้นไม้ และเปลือกยูคาลิปตัส ให้กลายเป็นก๊าซด้วย Gasifier Unit แล้วนำก๊าซที่ได้ไปใช้กับเครื่องปั่นก๊าซ (Gas Turbine) เพื่อผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งในก๊าซที่ได้เพื่อนำไปผลิตไฟฟ้านั้นฝุ่นละออง ที่ปนเปื้อนอยู่ในกระแสก๊าซจะถูกกำจัดโดยถุงกรอง (Bag Filter) เป็นผลให้ลดการเกิดฝุ่นละออง ได้ร้อยละ 90 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.9$) อีกทั้งมลสาร NO_x (Nitrogen Oxide) ก็ลดลงเช่นกันเนื่องจาก Gasification Systems ใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำ เป็นผลให้ NO_x ลดลงร้อยละ 50 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.5$) (Faaij *et al.*, 1997) เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิงของงานวิจัยในครั้งนี้

สำหรับระบบ Biomass Integrated Gasification Cycle: BIGCC คือ ระบบการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวล โดยนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของก๊าซที่เผาไหม้ได้ง่าย หลักการพื้นฐานที่สำคัญของวิธีการมี 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมสภาพเชื้อเพลิงชีวมวล (Pretreatment) ขั้นตอนการปรับเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็นก๊าซ (Gasification) และขั้นตอนการทำความสะอาดก๊าซที่ผลิตได้ (Gas Cleaning) ซึ่งขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีการทำชีวมวลให้มีขนาดเล็กลง (Pulverizing) และล้างให้สะอาด จากนั้นก็นำเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซโดย

นำไปเผาที่อุณหภูมิ และความดันสูง สภาพที่จำกัดปริมาณออกซิเจน (Oxygen) (นพภาพร และคณะ , 2547)

3.4.2.5 ปรับปรุงวิธีการเผาเป็นการเผาที่ให้ NO_x ต่ำ (Low NO_x Burner) โดยปรับปรุงวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผาเพื่อลดปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำ โดยการขยายพื้นที่เผาไหม้ หรือพื้นที่ผิวของเปลวไฟเพื่อทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟ และแรงดันของออกซิเจนในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ลดลง (นพภาพร และคณะ, 2547) ส่งผลให้ปริมาณของ NO_x ลดน้อยลงประมาณร้อยละ 40 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.4$) (EC, 2001)

3.4.3 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการเผาไหม้ของเหลวดำ (Recovery Boiler)

หม้อต้มสารเคมี หรือ Recovery Boiler เป็นส่วนหนึ่งของอีกหลายกิจกรรมที่อยู่ในหน่วยการนำกลับสารเคมี ซึ่งปล่อยมลสาร NO_x และฝุ่นละออง (Particulates) ออกสู่สิ่งแวดล้อมภายใต้สัดส่วนร้อยละ 80 จากการพิจารณา เป็นผลให้เกิดสภาวะฝนกรด สภาวะยูโทรฟิเคชั่น สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ทางเลือกที่นำมาใช้เพื่อลดมลสารที่เกิดขึ้นมีดังนี้

3.4.3.1 ควบคุมสภาวะเตาเผา (Over Fire Air: OFA) เป็นเทคนิคที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) โดยปรับปรุงการเผาไหม้บริเวณหม้อต้มไอน้ำ ด้วยการเพิ่มปริมาณอากาศทางเข้าของหม้อต้มไอน้ำ ให้มากกว่าภายในหม้อต้มไอน้ำ ส่งผลให้เกิดอากาศส่วนเกินภายนอกหม้อต้มไอน้ำ ทำให้ปริมาณ NO_x ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดน้อยลงจากอากาศส่วนเกินภายนอก (นพภาพร และคณะ, 2547) ร้อยละ 20 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.2$) (EC, 2001)

3.4.3.2 Black Liquor Gasification Combined Cycle: BLGCC เป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า และลดการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Larson *et al.,* 2003; Farahani *et al.,* 2004 and Mollersten *et al.,* 2004) เป็นเทคนิคที่ใช้อุณหภูมิต่ำ แต่ใช้ความดันสูงในการเปลี่ยนของเหลวดำ (Black Liquor) ให้เป็นก๊าซเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ของเหลวดำ (Black Liquor) เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง กับหม้อต้มไอน้ำนำกลับคืนสารเคมี (Recovery Boiler) ก๊าซที่ได้อาจปนเปื้อนด้วย Hydrogen (H_2) และ Carbon Monoxide (CO) แต่ก็ถูกกำจัดออกได้ภายใต้วัฏจักรการเผาไหม้ก๊าซ (Gas Turbine Combined Cycle) ทางเลือกดังกล่าวเหมาะสำหรับการเป็นทางเลือกในอนาคต ประสิทธิภาพของ BLGCC ส่งผลให้ลดการปลดปล่อยมลสาร SO_2 NO_x CO และ Particulates ได้ในสัดส่วนร้อยละ 40 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.4$) ร้อยละ 25 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.25$) ร้อยละ 8 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.08$) และร้อยละ 60 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.6$) (Larson *et al.,* 2003) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการ

นำวิธีการ BLGCC มาใช้นั้นอาจส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณการใช้น้ำมันเตาด้วย ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นดังกล่าว จะถูกรวมไว้ในการคำนวณผลกระทบข้างเคียงทั้งหมด

3.4.3.3 เพิ่มความเข้มข้นของของเหลวดำ (Increasing of Dry Solid Content of Black Liquor: DS) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อควบคุม SO_2 โดยเพิ่มความเข้มข้นของของเหลวดำ (Black Liquor) ให้ได้ประมาณร้อยละ 80 ด้วยวิธีการทำระเหย (Evaporation) ด้วยการติดตั้งเครื่อง Superconcentrator ซึ่งเป็นเครื่องมือตรวจวัดความเข้มข้น เนื่องจาก Sodium (Na) จะถูกระเหย และทำปฏิกิริยากับ Sulfur (S) ในระหว่างการทำระเหยส่งผลให้ SO_2 และ TRS ลดลงร้อยละ 80 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.8$) และร้อยละ 60 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.6$) (Poyry, 1992) ตามลำดับ

3.4.3.4 เครื่องดักฝุ่นไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator: ESP) เป็นเครื่องมือที่ใช้แรงไฟฟ้าในการแยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซโดยมีหลักการ คือ ใส่ประจุให้อนุภาค แล้วผ่านอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเข้าไปในสนามไฟฟ้าสถิต อนุภาคเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้าหา และถูกเก็บบนแผ่นเก็บที่มีศักย์ไฟฟ้าตรงกันข้ามกับของอนุภาค ESP มีประสิทธิภาพสูงในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (นพภาพร และคณะ, 2547) โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้มากถึงร้อยละ 95 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.95$) (นพภาพร และคณะ, 2547)

3.4.3.5 ไซโคลน (Cyclone) เครื่องมือดังกล่าวอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง เพื่อให้ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 10 ไมครอน กระทบผนัง และตกลงสู่ที่เก็บฝุ่น (นพภาพร และคณะ, 2547) มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ร้อยละ 80 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.8$) (นพภาพร และคณะ, 2547)

3.4.3.6 ถุงกรอง (Bag Filter) เป็นอุปกรณ์ที่แยกฝุ่นออกจากกระแสก๊าซที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาด 0.2 ถึง 0.5 ไมครอน ใช้แยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดวิธีการหนึ่ง โดยทั่วไปเครื่องกรอง คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนประกอบด้วยสารที่เป็นเม็ดเล็ก หรือเส้นใย ซึ่งจะกักกันอนุภาคไว้ และให้ก๊าซไหลผ่านช่องว่างของเครื่องกรอง ชั้นฝุ่นที่สะสมอยู่บนผ้ากรองนี้จะช่วยกรองอนุภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นประมาณร้อยละ 65 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.65$) (นพภาพร และคณะ, 2547)

3.4.4 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการเผาไหม้น้ำมันเตา (Bunker Oil Use in Lime Kiln)

น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงที่ถูกนำมาใช้กับเตาเผาปูนขาวในหน่วยการนำกลับคืนสารเคมี ปล่อยมลสาร CO_2 SO_2 และ NO_x ออกสู่สิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน สภาวะฝนกรด สภาวะยูโทรฟิเคชั่น สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ทางเลือกที่ศึกษา และนำมาใช้ในที่นี้ คือ

3.4.4.1 ใช้ก๊าซธรรมชาติแทนที่น้ำมันเตา (Substitution Bunker Oil by Natural Gas) คือ การนำก๊าซธรรมชาติมาใช้แทนการใช้น้ำมันเตา ซึ่งมีประสิทธิภาพลดการใช้น้ำมันเตาได้ทั้งหมด ($rf_{\alpha} = 1$) อีกทั้งยังมีส่วนในการลด CO_2 และ SO_2 ได้ร้อยละ 20 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.2$) และ 100 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 1$) (IPCC, 1997) ตามลำดับ ถึงแม้ว่าการแทนที่น้ำมันเตาด้วยก๊าซธรรมชาติจะมีการปลดปล่อยมลสารจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติมาแทนที่น้ำมันเตา แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันเตาจัดเป็น Heavy Fuel ส่วนก๊าซธรรมชาติเป็น Fossil Fuel ซึ่งสะอาดกว่า ดังนั้นการแทนที่น้ำมันเตาด้วยก๊าซธรรมชาติทำให้เกิดผลดีกับสิ่งแวดล้อม (Lopes *et al.,* 2003)

3.4.4.2 ใช้ Scrubber เป็นตัวดูดซึม สำหรับหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีมลสาร SO_2 เป็นตัวหลักที่เกิดขึ้นจากหม้อต้มนำกลับคืนสารเคมี เตาเผาปูนขาว และถังพักของเหลวดำ (Smelt Tanks) (Bordado and Gomes, 2002) Scrubber เป็นเครื่องมือที่ใช้กันโดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งใช้ดูดซึมมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในกระแสก๊าซด้วย Scrubber Solution สามารถลด SO_2 ได้ร้อยละ 90 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.9$) อีกทั้งยังลด NO_x และ TRS ได้ร้อยละ 50 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.5$) และ 80 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.8$) (UNEP, 1996 and Hynninen, 1998)

3.4.4.3 Selective Catalytic Reduction: SCR เป็นวิธีการใช้แอมโมเนีย (NH_3) ฉีดเข้าไปในก๊าซไอเสียเพื่อให้ NO_x ในก๊าซไอเสียเกิดปฏิกิริยา Reduction เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาช่วยทำให้ NO_x กลายเป็น N และ H_2O (น้ำ) ซึ่งไม่มีพิษเป็นผลให้ลดการเกิด NO_x ได้ร้อยละ 75 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.75$) (Cofala and Syri, 1998) แต่มีผลต่อการเพิ่ม N_2O ร้อยละ 30 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = -0.3$) (Oonk and Kroeze, 1998)

3.4.4.4 Selective Non-catalytic Reduction: SNCR วิธีการ คือ ใช้แอมโมเนียเป็น Reducing Agent ฉีดพ่นเข้าไปในไอเสียเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับ NO_x ในสถานะก๊าซให้กลายเป็น N โดยไม่ใช้ตัวเร่ง ซึ่งลด NO_x ได้ร้อยละ 60 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.6$) (Hynninen, 1998) แต่ผลข้างเคียงที่ตามมาคือ ทำให้ N_2O เพิ่มขึ้น ร้อยละ 20 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = -0.2$) (Oonk and Kroeze, 1998)

3.4.5 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการรีดน้ำออก (De-Watering)

ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากการรีดน้ำออกในกระบวนการผลิต พบว่า COD ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก ซึ่งทางเลือกที่ศึกษา และนำมาใช้ในการลด COD มีดังนี้

3.4.5.1 ติดตั้งถังดูดสุญญากาศ (Additional Vacuum Extraction Tanks) เป็นวิธีการรวบรวมน้ำที่เกิดจากกระบวนการรีดน้ำ เพื่อรวบรวมน้ำที่เกิดจากการรีด และสามารถป้องกันการหกล้นของน้ำได้ โดยน้ำที่ถูกรีดออกจากแผ่นกระดาษจะถูกดูดเข้าสู่ถังซึ่งอยู่ด้านล่าง ถังสุญญากาศดังกล่าวจะดูด และเก็บรวบรวมน้ำไว้ภายในถังเป็นผลให้ลดการปนเปื้อนของ COD ในน้ำเสียได้ร้อยละ 43 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.43$) (Avsar and Demirer, 2008)

3.4.5.2 นำน้ำจากการหล่อเย็นไปใช้ใหม่ (Reducing Seal Water Utilized in Vacuum Pumps) คือ การนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ โดยการนำมาใช้กับ Vacuum Pumps เพื่อลดการนำน้ำใหม่มาใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยสามารถลดปริมาณน้ำใช้ใหม่ได้ 1 ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 7.7 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.08$) (Avsar and Demirer, 2008)

3.4.5.3 นำน้ำจากฝักบัวทำความสะอาด (Felt Showers) ผ้าสักราด กลับมาใช้ใหม่ (Reducing Fresh Water Usage in Felt Showers) โดยนำน้ำที่ใช้ใน Felt Showers ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้ในการทำสะอาดผ้าสักราด ซึ่งเป็นผ้าที่ใช้ในการซับกระดาษแผ่นเพื่อให้กระดาษแห้ง ก่อนเข้าสู่กระบวนการอบ ทำให้เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น น้ำที่นำมาใช้กับ Felt Showers จะต้องเป็นน้ำที่สะอาดเนื่องจากผ้าสักราดที่ใช้น้ำทำความสะอาดจะต้องสัมผัสกับกระดาษโดยตรง จึงเป็นผลให้จะต้องไม่เกิดการไปเปื้อนไปสู่กระดาษที่ถูกดูดซับ โดยน้ำดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่กับกิจกรรมอื่นได้ เช่น ตีผสมเยื่อ เพื่อลดการใช้น้ำใหม่ได้ 1 ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 7.7 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.08$) (Avsar and Demirer, 2008)

3.4.5.4 แทนที่ Gland Seal ด้วย Mechanical Seal (Replacing of Gland Seals and Collection of Cooling Water) โดย Mechanical Seal เป็นอุปกรณ์กันรั่วซึมที่ผลิตจากวัสดุหลายชนิดและนำมาประกอบเข้าชุด (Westbound Engineering Co., Ltd, 2552) ที่มีความทนทานต่อความร้อนได้ดีกว่า Gland Seal เนื่องจาก Gland Seal เป็นส่วนหนึ่งที่ก่อให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก เพราะคุณสมบัติทนความร้อนได้น้อย โดยมีโครงสร้างเป็นโลหะทีมีความบาง (สุชาติ ปรีชาธร, 2552) ซึ่งต่างจาก Mechanical Seals ที่มีคุณสมบัติทนต่อความร้อนได้ดีกว่า จึงส่งผลให้สามารถกันการรั่วซึมได้ดีกว่า ดังนั้น เพื่อควบคุมการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็นซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยการแทนที่ด้วย Mechanical Seal สามารถลดปริมาณการใช้น้ำใหม่ได้ 0.5 ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือร้อยละ 3.85 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.04$) (Avsar and Demirer, 2008)

3.4.5.5 ติดตั้งระบบเก็บรวบรวมน้ำหกล้น (Spillage Collection) เป็นวิธีการจัดการน้ำเสียโดยทั่วไป โดยใช้เทคนิคการรวบรวมน้ำเสียไม่ให้เกิดการหกล้น ซึ่งช่วยในเรื่องลดการเกิดน้ำเสียได้ เป็นผลให้ปริมาณ COD ลดลงด้วยในสัดส่วนร้อยละ 30 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.3$) (TAPPI, 1996)

3.4.6 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการฟอกเยื่อ (Bleaching Pulp) และบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment)

มลสารที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมทั้ง 2 กิจกรรม คือ P (Phosphorus) สำหรับการฟอกเยื่อนั้น หลังจากการฟอกเยื่อแล้วอาจมีการหลงเหลืออยู่ของสารลิกนินประมาณร้อยละ 1 (DIW, 1999) โดยมี P เป็นองค์ประกอบหนึ่งในลิกนิน แต่จะถูกล้างออกไปอีกครั้งหนึ่งในกิจกรรมการล้างเยื่อหลังจากฟอกแล้ว น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการล้างก็จะต้องถูกรวบรวมเพื่อการบำบัดต่อไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการรวมกิจกรรมการฟอก การล้าง และการบำบัดเสียเป็นเรื่องกิจกรรมเดียว ที่จะต้องหาแนวทางแก้ไขเพื่อลด P ที่เกิดขึ้น ซึ่งทางเลือกจากการศึกษา เพื่อนำมาใช้ลด P มีดังนี้

3.4.6.1 ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge: AS) เป็นระบบการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ที่อาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย หลักการของระบบ AS คือ การหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ในถังเติมอากาศ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2547) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่งผลให้ลดปริมาณ P ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ร้อยละ 70 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.7$) อีกทั้งยังสามรถลด COD ได้ในสัดส่วนร้อยละ 80 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.8$) (DIW, 1999)

3.4.6.2 ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon: AL) หรือเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ที่ต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก หากมีพื้นที่จำกัดระบบดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมมากนัก (Jawjit *et al.,* 2006) ระบบบ่อเติมอากาศเป็นระบบทางชีวภาพที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ และมีประสิทธิภาพในการลด P ได้ร้อยละ 80 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.8$) อีกทั้งยังสามารถลด COD ได้ร้อยละ 70 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.7$) (DIW, 1999)

สำหรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตเยื่อ และกระดาษนั้นมีธาตุอาหาร P ต่ำ ซึ่งไม่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มธาตุอาหารแก่ระบบบำบัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบน้ำเสียแบบชีวภาพ (Tiina *et al.,* 2008) ที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย ส่งผลให้ปริมาณ P เพิ่มมากขึ้นจากการเติมธาตุอาหารแก่ระบบบำบัดน้ำเสีย และปนเปื้อนออกมากับน้ำเสียดังกล่าว จึงทำให้ P ที่เกิดขึ้นนั้นจัดอยู่ในร้อยละ 80 ของมลสารทั้งหมดที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น

3.4.7 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการฝังกลบ (Landfill)

จากการศึกษาหลุมฝังกลบก่อให้เกิดมลสาร CO_2 และ CH_4 ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน และทางเลือกที่นำมาใช้เพื่อลดมลสารที่เกดขึ้นคือ

3.4.7.1 บำบัดก๊าซจากหลุมฝังกลบ (Landfill Gas Treatment) โดยวิธีการเก็บรวบรวม และบำบัดก๊าซที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบ วิธีการจัดการพื้นที่หลุมฝังกลบดังกล่าวเป็นการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่ฝังกลบ จะต้องจัดให้มีระบบรวบรวม และระบบบำบัดก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหลุมฝังกลบ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดมลสารที่เกิดจากหลุมฝังกลบ และก๊าซเรือนกระจก (CO_2 CH_4 และ N_2O) ได้ร้อยละ 50 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.5$) (Ongmongkoklkul *et al.,* 2001)

3.4.7.2 คัดเลือกขยะ (Landfill Optimization) ในที่นี้หมายถึง การคัดแยกส่วนก่อน เช่น การนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ หรือนำไปเผาแทนการฝังกลบ เพื่อลดมลสารชนิดต่างๆ จากหลุมฝังกลบ และมลสารที่ศึกษาในที่นี้ คือ CH_4 ซึ่งสามารถลดการปลดปล่อยมลสาร CH_4 จากหลุมฝังกลบได้ร้อยละ 10 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.1$) (Michiel and Morton, 1995)

3.4.8 ทางเลือกในการลดมลพิษจากการเทกองกลางแจ้ง (Open Dump)

กิจกรรมเทกองกลางแจ้ง เป็นวิธีการหนึ่ง ที่ใช้ในการกำจัดกระดาษ โดยมลสารหลักที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม และนำมาพิจารณา คือ CH_4 ซึ่งเป็นสาเหตุก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน จากการศึกษาทางเลือกเพื่อนำมาใช้ลดมลสารที่เกิดขึ้นมี ดังนี้

3.4.8.1 นำก๊าซ CH_4 กลับไปใช้ใหม่โดยการเผา (CH_4 Recovery and Combustion) เป็นทางเลือกอย่างหนึ่งที่จะช่วยลด CH_4 จากการเทกองกลางแจ้งได้ร้อยละ 60 ($rf_{\varepsilon,\alpha} = 0.6$) (IPCC, 1996) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ ก๊าซมีเทนจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่โดยการเผาให้สะอาดก่อนการนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไป

3.4.8.2 ใช้วิธีการเผาแทนที่การเทกองกลางแจ้ง (Incineration Replacing Open Dump) ใช้วิธีการเผาแทนการเทกองกลางแจ้งซึ่งจะช่วยลดการเกิด CH_4 ได้ทั้งหมดคิดเป็น ($rf_{\alpha} = 0.1$) (IPCC, 2006) เนื่องจากกระดาษเสียทั้งหมดถูกกำจัดไปโดยการเผา เมื่อเทียบกับกรณีศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทางเลือกที่ศึกษา และนำมาพิจารณาเพื่อลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ดังกล่าว สามารถลดมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภทได้ ซึ่งบางทางเลือกอาจเป็นทางเลือกที่นำมาใช้ได้ในปัจจุบัน และบางทางเลือกอาจเป็นทางเลือกสำหรับใช้ในอนาคต อีกทั้งทางเลือกที่นำมาเสนอทั้งหมดนี้ อาจมีผลกระทบข้างเคียงเกิดขึ้น ซึ่งนั่นหมายถึงหลังจากการนำทางเลือกมาใช้เพื่อลดมลสารตัวหนึ่ง อาจส่งผลต่อการเพิ่ม

หรือลดมลสารอีกตัวหนึ่งได้เช่นกัน แต่หากพิจารณาในกรณีที่นำมาใช้เพื่อลดเฉพาะมลสารที่ต้องการจะลดแล้ว ทางเลือกแต่ละทางเลือกเหมาะสมกับการนำมาใช้ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดมลสารแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภทที่แตกต่างกันออกไปเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัย สำหรับค่าประสิทธิภาพที่ติดลบ ในตารางที่ 3-9 นั้นเป็นเพราะทางเลือกที่นำมาใช้ลดมลสารที่ต้องการลดอาจส่งผลต่อการเกิดมลสารชนิดอื่นๆ ซึ่งในขณะเดียวกันมลสารตัวที่เกิดขึ้นมานั้น ก็สามารถส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้หลายประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ด้วย เช่น การแทนที่เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยก๊าซธรรมชาติ ผู้วิจัยนำทางเลือกดังกล่าวมา เพื่อใช้ในการลดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งสามารถลดการเกิดฝุ่นละอองได้ดี แต่ในขณะเดียวกันนั้นการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติก็มีการปลดปล่อยมลสารต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ด้วยเช่นกัน ซึ่งมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ มีผลต่อเกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน สภาวะฝนกรด และสภาวะยูโทรฟิเคชั่นเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของทางเลือกดังกล่าวมีค่าติดลบ ในขณะเดียวกันการนำทางเลือก การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของของเหลวดำ เพื่อนำมาลดมลสาร SO_2 จากกิจกรรมของหม้อต้มไอน้ำนำกลับคืนสารเคมี ก็มีผลข้างเคียงต่อการเพิ่ม NO_x ซึ่งส่งผลต่อสภาวะยูโทรฟิเคชั่น สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เช่นเดียวกันกับการนำทางเลือกการใช้ SCR และ SNCR มาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสาร NO_x จากการเผาไหม้น้ำมันเตา แต่ผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นกลับส่งผลให้มลสาร N_2O เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในกรณีอ้างอิงเพื่อลดการปลดปล่อยมลสารในแต่ละกิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆ

กิจกรรม	ทางเลือก	ตัวย่อ	ประสิทธิภาพทางเลือก (%)					
			GW*	AD*	EP*	SM*	HT*	Overall*
ต้มเยื่อ	กำจัด TRS โดยใช้ stripping column	STRIP	0	9.42	0	0	0.40	1.92
	นำกลับคืนของเหลวขาว ร่วมกับ NaOH scrubber	LQ_SCRUB	0	10.36	0	0	0.44	2.11
	ควบคุมสภาวะหม้อต้มเยื่อ	IN_DIGES	0	4.19	0	0	0.18	0.85
	ใช้ Activated carbon เป็นตัวดูดซับ	AT_CARBON	0	10.36	0	0	0.44	2.11
เผาไหม้ชีวมวล	ใช้ก๊าซธรรมชาติแทนที่ชีวมวล	NG_BIOMS	-65.91	5	1.25	83.5	45	11.90
	ระบบพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์	SLA_H	0.41	1.75	0.44	8.57	1.06	2.79
	ระบบพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์	SLA_E	4.07	17.51	4.38	85.70	52.60	28.06
	BIGCC	BIGCC	0	8.75	2.19	64.12	43.09	19.21
	ปรับปรุงวิธีการผลิตเตาเผา	LNB	0	7	1.75	0.73	4.26	2.27
บำบัดน้ำเสีย	ระบบตะกอนเร่ง	AS	0	0	57.93	0	0	21.23
	ระบบบ่อเติมอากาศ	AL	0	0	60.07	0	0	22.01

ตารางที่ 3-9 ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในกรณีอ้างอิงเพื่อลดการปลดปล่อยมลสารในแต่ละกิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆ (ต่อ)

กิจกรรม	ทางเลือก	ตัวย่อ	ประสิทธิภาพทางเลือก (%)					
			GW*	AD*	EP*	SM*	HT*	Overall*
หม้อต้มไอน้ำนำกลับคืนสารเคมี	ควบคุมสภาวะเตาเผา	OFA	0	0.9	0.22	0.09	0.55	0.29
	BLGCC	BLGCC	0	6.18	0.28	0.31	23.24	1.52
	เพิ่มความเข้มข้นของของเหลวดำ	H_SOLID	0	10.14	0	0	0.35	2.06
	เครื่องดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์	ESP	0	0	0	0	35.43	0.11
	ไซโคลน	CYCLONE	0	0	0	0	29.84	0.09
	ถุงกรอง	BAG	0	0	0	0	24.24	0.08
เผาไหม้น้ำมันเตา	ใช้ก๊าซธรรมชาติแทนที่น้ำมันเตา	NG_BKOIL	6.67	45	0.41	0.14	2.49	10.48
	นำ Scrubber มาใช้	SCRUB	0	41.61	0.65	0.27	2.91	8.78
	SCR	SCR	-0.02	3.87	0.97	0.4	2.35	1.25
	SNCR	SNCR	-0.01	3.09	0.77	0.32	1.88	1

ตารางที่ 3-9 ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในกรณีอ้างอิงเพื่อลดการปลดปล่อยมลสารในแต่ละกิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆ (ต่อ)

กิจกรรม	ทางเลือก	ตัวย่อ	ประสิทธิภาพทางเลือก (%)					
			GW*	AC*	EP*	SM*	HT*	Overall*
รีดน้ำออก	ติดตั้งถังดูดสุญญากาศ	ADD_VACUUM	0	0	3.58	0	0	1.31
	นำน้ำจาก felt showers กลับมาใช้ใหม่	RE_FELTWT	0.04	0	0	0.00048	0	0.0065
	แทนที่ gland seal ด้วย mechanical seal	REP_GLAND	0.02	0	0	0.00024	0	0.0033
	ระบบเก็บรวบรวมน้ำหกล้น	SPILL	0	0	2.50	0	0	0.91
	นำ seal water กลับมาใช้ใหม่กับ vacuum pump	RE_SEALWT	0.04	0	0	0	0	0.01
ฝังกลบ	บำบัดก๊าซจากหลุมฝังกลบ	GAS_TM	10.10	0	0	0.74	0	1.91
	คัดเลือกขยะก่อนนำมาฝังกลบ	LAND_OP	0.02	0	0	0.15	0	0.38
เทกองกลางแจ้ง	นำก๊าซ CH_4 กลับไปใช้ใหม่โดยการเผา	RE_COMBUS	25.79	0	0	1.9	0	4.87
	ใช้วิธีการเผาแทนที่การเทกองกลางแจ้ง	IN_REP_OPEN	42.98	0	0	3.16	0	8.11

หมายเหตุ * หมายถึง GW คือ สภาวะโลกร้อน, AC คือ สภาวะฝนกรด, EP คือ สภาวะยูโทรฟิเคชั่น, SM คือ สภาวะหมอกควันพิษ, HT คือ สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์ และ Overall คือ ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (การคำนวณประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ลดการปลดปล่อยมลสารในแต่ละกิจกรรมที่มีผลในการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเภท แสดงไว้ดังภาคผนวก ค)

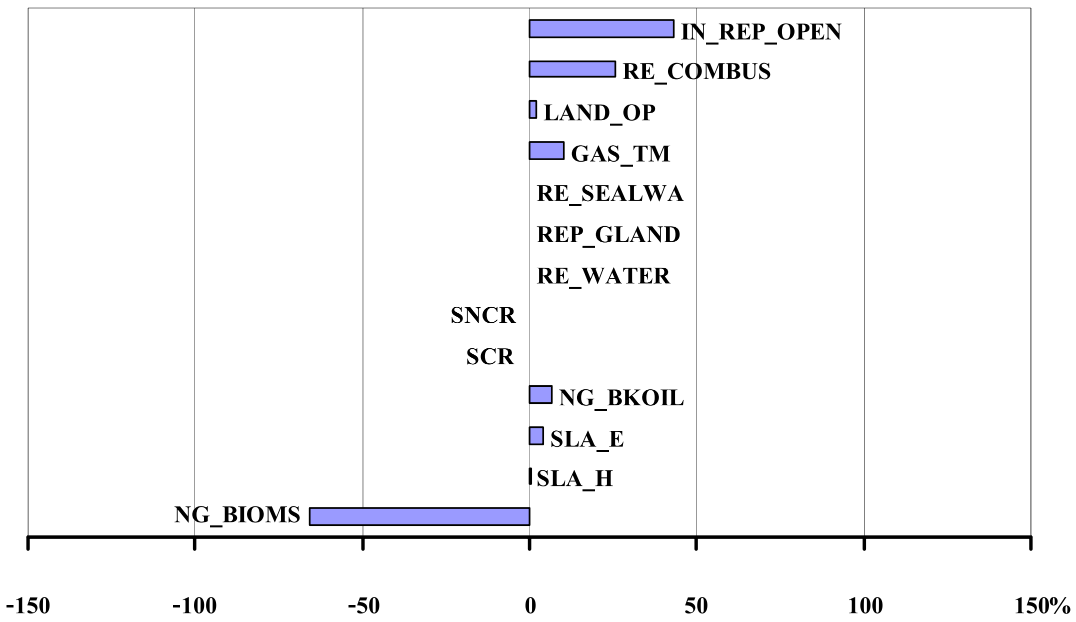
3.5 ผลการประเมินหลังจากนำทางเลือกมาใช้ (Result of Emission Reduction)

การนำทางเลือกมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ จากกิจกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาประเมินโดยใช้แบบจำลองในครั้งนี้ ผู้วิจัยประเมินประสิทธิภาพของทางเลือกแต่ละทางเลือก (Single Option) จากกรณีอ้างอิงซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการจัดการลดการเกิดมลพิษต่างๆ รายละเอียดของกรณีอ้างอิงได้กล่าวไว้แล้วดังหัวข้อที่ 3.4 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละทางเลือกมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 สภาวะโลกร้อน (Global Warming)

จากการประเมิน พบว่า สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) คือ CO_2 CH_4 และ N_2O โดยมลสาร CH_4 เป็นมลสารหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบจากกิจกรรมการกำจัดกระดาษโดยวิธีการฝังกลบ และเทกองกลางแจ้ง ซึ่งการนำวิธีการเผามาใช้แทนการเทกองมีประสิทธิภาพในการลดมลสาร CH_4 ได้ร้อยละ 43 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง ส่วนทางเลือกการนำก๊าซ CH_4 ที่เกิดขึ้นจากการเทกองกลางแจ้ง กลับไปใช้ใหม่ด้วยวิธีการเผา เพื่อให้ก๊าซสะอาดก่อนก็เป็นอีกเทคนิคที่น่าสนใจซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดมลสาร CH_4 ที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนได้ประมาณร้อยละ 26 นอกจากนี้การนำ เทคนิคการเก็บรวบรวม และบำบัดก๊าซจากหลุมฝังกลบ ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดก๊าซเรือนกระจกในที่นี้ คือ CO_2 และ CH_4 ที่เกิดขึ้นจากการฝังกลบได้ประมาณร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิงดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-9

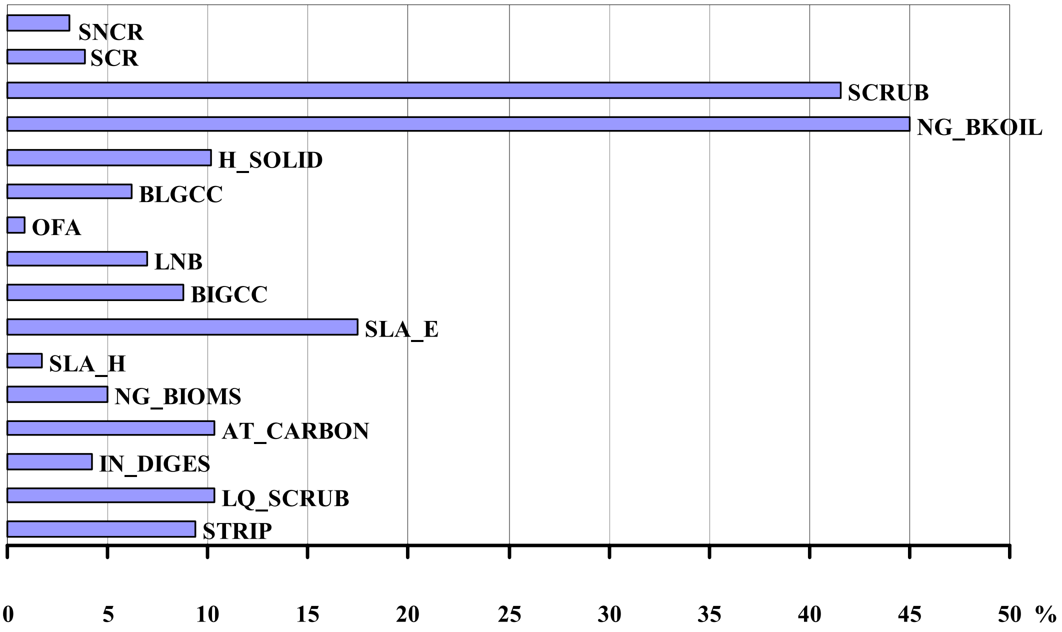
สำหรับมลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นจำนวนมากจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล การนำก๊าซธรรมชาติมาใช้แทนที่เชื่อเพลิงชีวมวลสามารถลด CO_2 ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื่อเพลิงชีวมวลได้แต่มลสาร CO_2 จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติเกิดขึ้นแทนที่ ดังนั้นประสิทธิภาพของการนำทางเลือกมาใช้จึงมีค่าติดลบ จากตารางที่ 3-9 นอกจากนี้ผลกระทบด้านบวกของทางเลือกการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้แทนที่เชื่อเพลิงชีวมวลสามารถลดฝุ่นละออง (Particulates) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อการเกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ สำหรับ การนำทางเลือกการใช้ SCR และ SNCR มาใช้เป็นทางเลือกเพื่อลดมลสาร NO_x ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดการเกิด NO_x ได้ดี แต่ผลกระทบข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกทั้ง2 ทางเลือกมาใช้นั้น ส่งผลต่อการเกิดมลสาร N_2O ซึ่งมีผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าติดลบกับกระทบสภาวะโลกร้อน ดังภาพประกอบที่ 3-9



ภาพประกอบที่ 3-9 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนเทียบกับกรณีอ้างอิง

3.5.2 สภาวะฝนกรด (Acidification)

มลสาร SO_2 TRS NH_3 NO_x เป็นมลสาระสำคัญที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น โดยการเผาไหม้น้ำมันเตาเป็นแหล่งกำเนิดมลสารที่ก่อให้เกิดสภาวะฝนกรดที่สำคัญ โดยเฉพาะมลสาร SO_2 มากถึงร้อยละ 36 ของมลสารทั้งหมดที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบดังกล่าว และทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการลดการเกิดสภาวะฝนกรด คือ การแทนที่น้ำมันเตาด้วยก๊าซธรรมชาติ สามารถลดการเกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดได้เท่ากับร้อยละ 45 แม้ว่าการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้แทนที่น้ำมันเตาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่เพราะมลสารตัวหลักที่ต้องการลด คือ SO_2 ซึ่งการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติไม่ก่อให้เกิดก๊าซ SO_2 จึงส่งผลให้ทางเลือกดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงหากนำมาใช้เพื่อลดการเกิดสภาวะฝนกรดจากการเผาไหม้น้ำมันเตา ดังภาพประกอบที่ 3-10 นอกจากนี้การนำ Scrubber มาใช้เป็นทางเลือกเพื่อลดการปลดปล่อยมลสาร SO_2 จากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตาก็เป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ และมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดได้ร้อย 42 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง ซึ่งทางเลือกดังกล่าว นอกจากลด SO_2 ได้แล้วยังสามารถลด NO_x และ TRS ที่ปนเปื้อนในกระแสก๊าซจากการเผาไหม้น้ำมันเตาได้อีกด้วย

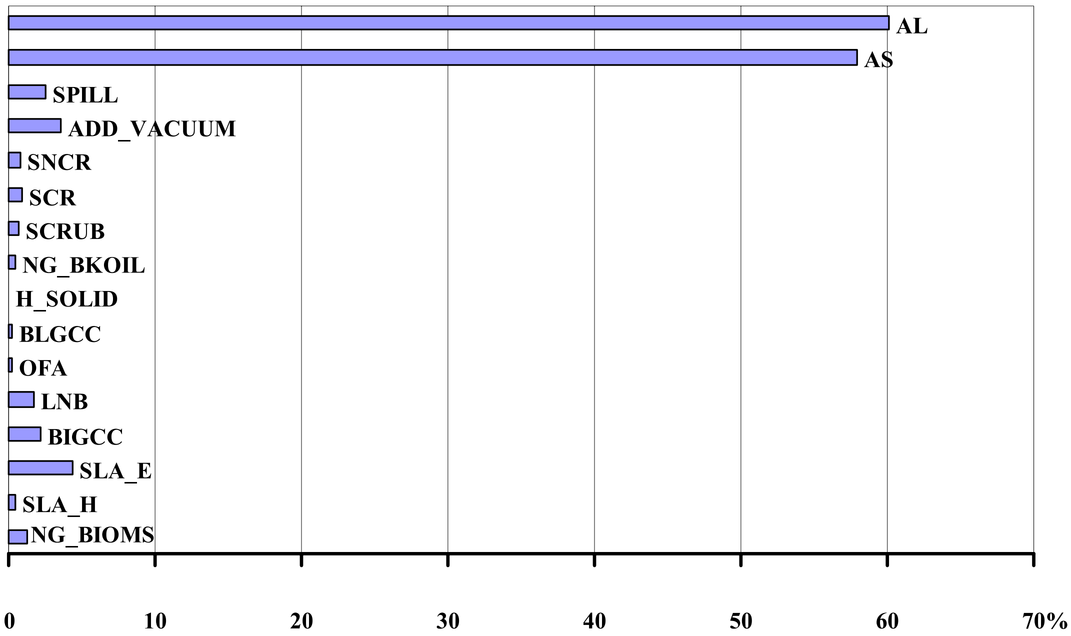


ภาพประกอบที่ 3-10 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเทียบกับกรณีอ้างอิง

TRS (Total Reduce Sulfur) ที่เกิดจากการต้มเยื่อเป็นมลสารหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด และการนำ White Liquor มาใช้ร่วมกับ NaOH Scrubber สามารถลดการปล่อย TRS ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถลดการปลดปล่อยมลสารที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดได้ประมาณร้อยละ 10 วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่นำมาประยุกต์ใช้ควบคู่ไปกับขั้นตอนการนำกลับคืนสารเคมี ซึ่งเปลี่ยนของเหลวดำที่ได้จากการต้มเยื่อ ให้เป็นของเหลวขาว (White Liquor) เพื่อนำ NaOH และ Na_2S ที่ได้ กลับมาใช้ในการต้มอีกครั้ง โดยภายใต้กระบวนการนำกลับคืนสารเคมีนั้น จะมีกิจกรรมการทำระเหยของ ของเหลวดำอยู่ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวสามารถช่วยลด TRS ได้ เนื่องจาก Sodium (Na) จะถูกระเหย และทำปฏิกิริยากับ Sulfur (S) ในระหว่างการทำระเหยส่งผลให้ SO_2 และ TRS ลดลงได้ และเมื่อนำ NaOH มาใช้เป็น Scrubber เพื่อกำจัด TRS ที่หลงเหลืออยู่ จึงส่งผลให้เทคนิคดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลด TRS มากยิ่งขึ้น (Faustino (Tino) Prado,P.E, 2003) มลสาร NO_x ที่ถูกปลดปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นก็สามารถลดลงได้ด้วยการนำไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Thermal Electricity) มาใช้ ซึ่งทางเลือกดังกล่าวส่งผลต่อการลดมลสาร NO_x ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบสภาวะฝนกรดได้อย่างมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง ดังภาพประกอบที่ 3-10

3.5.3 สภาวะยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication)

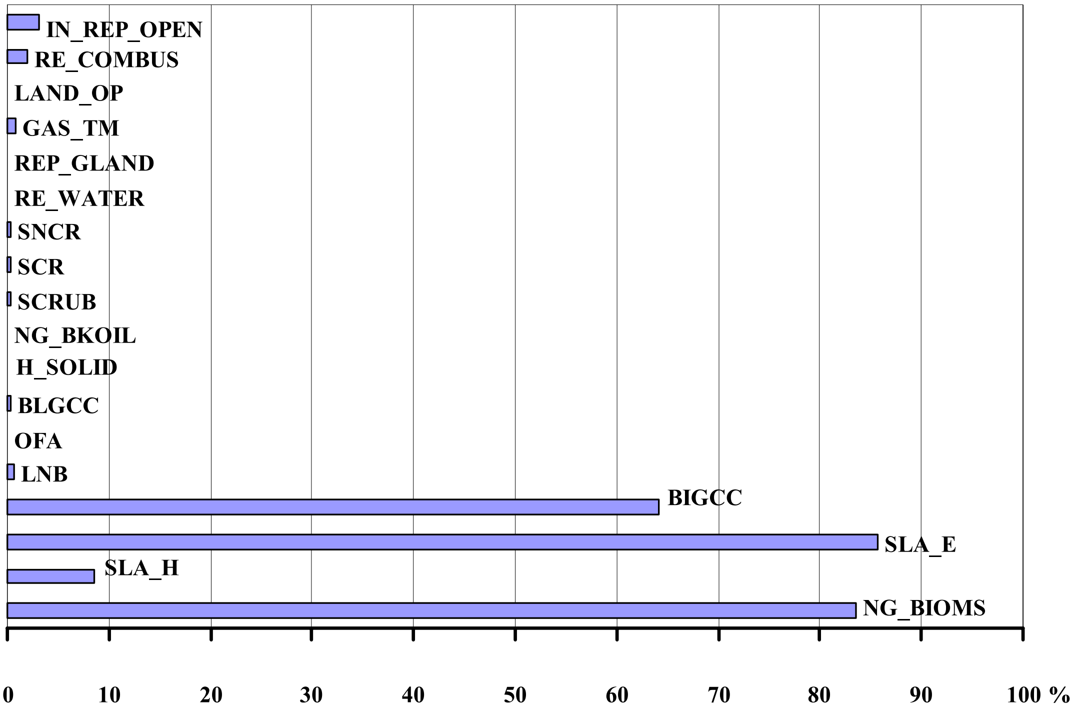
มลสารสำคัญที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น คือ ฟอสฟอรัส (P) และ COD โดยเฉพาะมลสาร P (Phosphorus) จากกิจกรรมการบำบัดน้ำเสีย (โรงเยื่อ และโรงกระดาษ) มากถึงร้อยละ 58 การนำวิธีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมาใช้เป็นวิธีการหนึ่งที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์เพื่อช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งการเติมธาตุอาหารที่จำเป็นก็เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่จะต้องมีเพื่อสภาวะที่เหมาะสมของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย และหากเติมธาตุอาหารในปริมาณที่ไม่เหมาะสมกับความต้องการของจุลินทรีย์ผลที่เกิดขึ้น คือ ธาตุอาหารตกค้างในระบบ และถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมส่งผลต่อการเกิดสภาวะยูโทรฟิเคชั่น ทางเลือกที่นำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว คือ การนำระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon: AL) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด P ซึ่งมีประสิทธิภาพมากถึงร้อยละ 60 ในการลดผลกระทบยูโทรฟิเคชั่น ดังภาพประกอบที่ 3-11 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง อีกทั้งยังเป็นทางเลือกที่เหมาะกับการนำมาใช้ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ (สุธา ขาวเธียร, 2548) เพราะ หากนำมาใช้จะต้องมีพื้นที่พอสำหรับการดำเนินงานทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของแต่ละโรงงานในการจัดสรรพื้นที่ ในขณะที่ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge: AS) มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นร้อยละ 58 เพราะสามารถลด P ซึ่งเป็นมลสารตัวหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบดังกล่าวได้ร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง สำหรับมลสาร COD ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการรีดน้ำออกในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน พบว่าการรวบรวมน้ำที่เกิดจากกระบวนการรีดน้ำ โดยการติดตั้งถังดูดสุญญากาศ ไว้ด้านล่างทำให้น้ำที่เกิดขึ้นจากการรีดถูกดูดเข้าสู่ถัง ป้องกันการหกล้นของน้ำได้ และมีประสิทธิภาพในการลดมลสาร COD ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเกิดสภาวะยูโทรฟิเคชั่น ได้ประมาณร้อยละ 4 เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ในการอ้างอิง



ภาพประกอบที่ 3-11 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นเทียบกับกรณีอ้างอิง

3.5.4 สภาวะหมอกควันพิษ (Smog)

มลสาระสำคัญที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษจากการประเมิน คือ CO และ NMVOC และจากทางเลือกที่ศึกษาทั้งหมด พบว่า ทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษได้มากที่สุด คือ การนำพลังงานทดแทนมาใช้เพื่อลดการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ เช่นพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 86 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง ดังภาพประกอบที่ 3-12 ทั้งนี้การนำทางเลือกดังกล่าวมาใช้ทำให้ลดมลสาร CO และ NMVOC ซึ่งเป็นมลสารตัวสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะหมอกควันพิษได้ การแทนที่เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยก๊าซธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 84 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง หากนำมาใช้ในการลดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ เนื่องก๊าซธรรมชาติมีค่าความร้อนมากกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลมากถึง 2 เท่า (IPCC, 1997) จึงสามารถนำมาทดแทนเชื้อเพลิงชีวมวลได้ในปริมาณที่น้อยกว่า เป็นผลให้แม้มีการปลดปล่อยมลสารชนิดต่างๆ จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติเกิดขึ้น แต่มลสารต่างๆ เหล่านั้นถูกปลดปล่อยจากปริมาณการเผาไหม้ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงมลสารต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อยในปริมาณความร้อนที่เท่ากันก๊าซธรรมชาติปลดปล่อยค่ามลสารออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เป็นผลให้ลดการเกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษได้

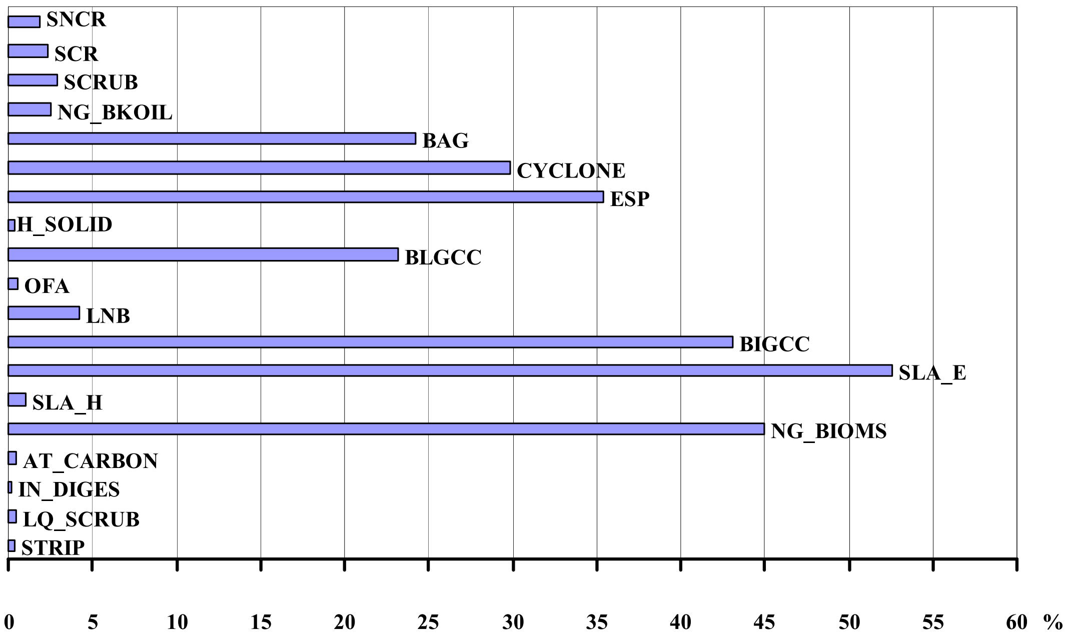


ภาพประกอบที่ 3-12 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษเทียบกับกรณีอ้างอิง

นอกจากนี้ เทคนิคการเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็ง (ชีวมวล) ให้เป็นก๊าซ (BIGCC) เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะกับการนำมาใช้เพื่อเป็นทางเลือกได้อีกทางเลือกหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยมลสาร CO และ NMVOC ที่เป็นสาเหตุในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกพิษได้ร้อยละ 64 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง

3.5.5 สภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Toxicity)

มลสารที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ที่ควรแก้ไขจากการประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน คือ NO_x และฝุ่นละออง (Particulates) ซึ่งทางเลือกต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสาร NO_x และฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และการเผาไหม้น้ำมันเตา คือ การนำพลังงานทดแทนที่ไม่ก่อให้เกิดการเผาไหม้และปลดปล่อยมลพิษต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ร้อยละ 53 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง ดังภาพประกอบที่ 3-13



ภาพประกอบที่ 3-13 ประสิทธิภาพของทางเลือกเพื่อลดการปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เทียบกับกรณีอ้างอิง

นอกจากนี้การนำวิธีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากของแข็งไปเป็นก๊าซ และจากของเหลวไปเป็นก๊าซ เช่น Biomass Gasification Combined Cycle: BIGCC และ Liquor Gasification Combined Cycle: BLGCC มาใช้ ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดการเกิดมลพิษต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ร้อยละ 43 และ 23 ตามลำดับ เนื่องจาก เชื้อเพลิงก๊าซสามารถเกิดการเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากกว่าเชื้อเพลิงของแข็ง และของเหลว ส่งผลให้ปริมาณมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นมีค่าลงลด ซึ่งลดการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ (Larson *et al.*, 2003; Farahani *et al.*, 2004 and Mollersten *et al.*, 2004) นอกจากนี้การนำเทคโนโลยีเครื่องดักฝุ่นมาใช้ภายในโรงงานก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ลดการเกิดผลกระทบความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ เช่น การนำ เครื่องกำจัดฝุ่น Electrostatic Precipitator: ESP เป็นซึ่งเครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต มีประสิทธิภาพในการลดการเกิดผลกระทบร้อยละ 35 ส่วนเครื่องกำจัดฝุ่นไซโคลน (Cyclone) และถุงกรอง (Bag Filter) มีประสิทธิภาพในการนำมาใช้เพื่อลดการผลกระทบได้ร้อยละ 30 และ 24 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง

ประสิทธิภาพของทางเลือกต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในแต่ละประเภทของผลกระทบที่เกิดขึ้นเป็นประสิทธิภาพของทางเลือกในการลดผลกระทบแต่ละประเภทเท่านั้น ประสิทธิภาพต่างๆ

เหล่านี้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบ หรือรวมกันได้กันได้ โดยจะต้องเปลี่ยนค่าผลกระทบต่างๆ ให้เป็นค่าปกติ (Normalized) ก่อนจึงจะสามารถนำค่าที่ได้มารวมกัน และเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งค่าที่ได้จากการรวมกันของค่าปกติทั้งหมด คือ ค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (Single Score หรือ Overall) ที่เกิดขึ้นทั้งวัฏจักรชีวิตของกระดาษพิมพ์เขียน ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

3.6 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall Environmental Impact)

จากการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมภายใต้การพิจารณาขอบเขตของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการคำนวณหาค่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission Score) ซึ่งมลพิษแต่ละชนิดจะถูกจัดเข้ากลุ่ม และถูกเปลี่ยนหน่วยเปรียบเทียบให้อยู่ในรูปเดียวกันทั้งหมด ในแต่ละประเภทของผลกระทบที่เกิดขึ้น ค่าการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนผู้วิจัยจะคัดเลือกค่าเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาทางเลือกสำหรับการลดมลพิษที่เกิดขึ้น โดยจะเลือกค่าการปลดปล่อยมลพิษแต่ละชนิด ที่รวมกันแล้วมากกว่าร้อยละ 80 ของแต่ประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ดังแสดงไว้ในดังตารางที่ 3-6 (หัวข้อที่ 3.2) เมื่อทราบถึงปริมาณของผลกระทบที่เกิดขึ้นของแต่ละประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อมแล้ว ค่าที่ได้ต่างๆ นั้นยังไม่สามารถนำมารวมกัน หรือเปรียบเทียบกันได้ เพราะอยู่ในหน่วยการเปรียบเทียบที่แตกต่างกันออกไป จำเป็นจะต้องเปลี่ยนหน่วยของแต่ละประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมด ให้อยู่ในรูปที่สามารถนำมารวมกัน หรือเปรียบเทียบกันให้ได้ก่อนโดยการทำให้เป็นค่าปกติ (Normalization) ค่าตัวคูณปกติ (Normalization Factor) แสดงไว้ดังตารางที่ 2-9 (บทที่ 2) เมื่อเปลี่ยนค่าผลกระทบ (Impact Score) ให้เป็นค่าปกติ (Normalized) แล้วค่าปกติที่ได้จะถูกนำมาให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting) ของแต่ละประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้นซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยกำหนดให้ประเภทผลกระทบที่นำมาศึกษามีความสำคัญเท่ากันทั้งหมด เนื่องจาก ต้องการทราบผลกระทบที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนซึ่งไม่รวมถึงระดับของการทำลาย หรือสร้างความเสียหายที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปของสิ่งแวดล้อม หรือกล่าวได้ว่าเป็นการประเมินผลกระทบขั้นกลาง ซึ่งหมายรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ระบบนิเวศน์ มนุษย์ และสิ่งก่อสร้าง) เท่านั้น (คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิต และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ, 2549) ผลที่ได้ คือ สามารถนำผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นมารวมกันเพื่อเป็นผลกระทบทั้งหมด (Single Score) ที่เกิดขึ้นภายใต้วัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

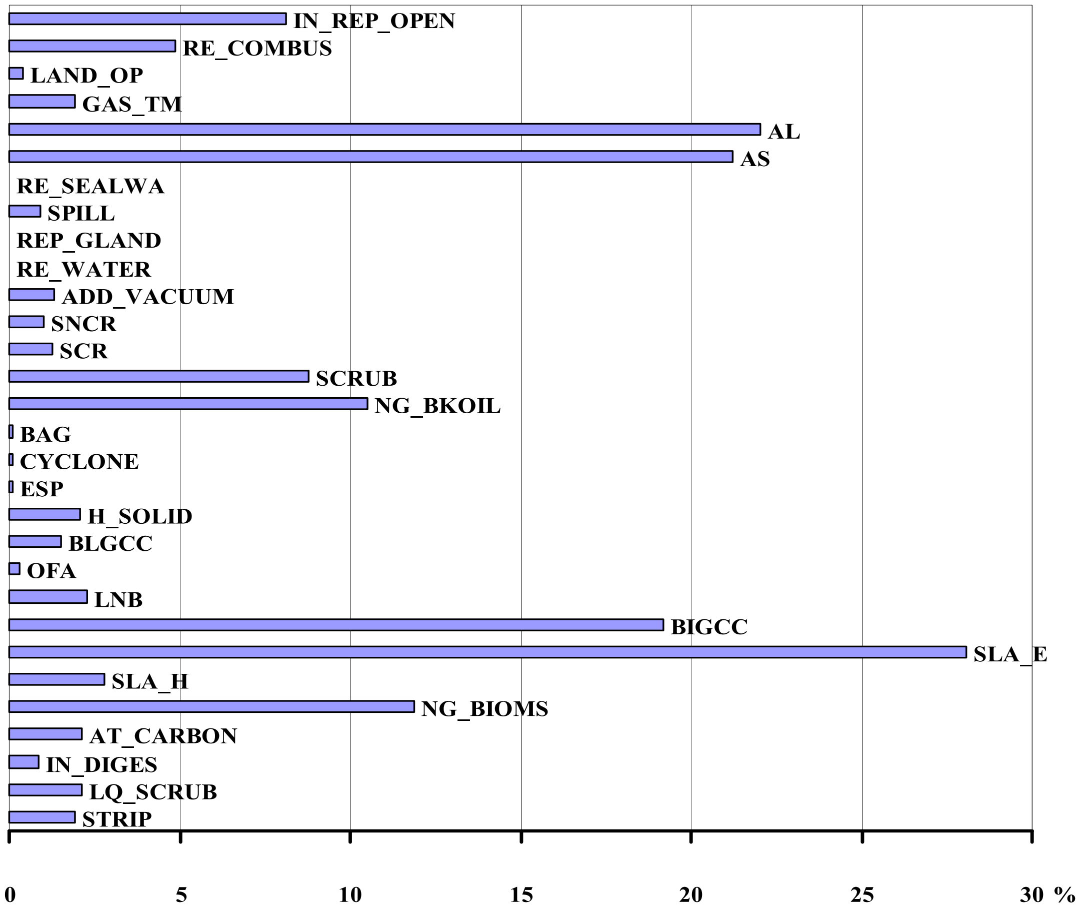
สำหรับการปรับค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปแบบเพื่อเปรียบเทียบ หรือรวมกันได้ โดยทำให้เป็นค่าปกติ (Normalized) นั้น เพื่อดูประสิทธิภาพโดยรวมของทางเลือกที่นำมาใช้สำหรับลดการปลดปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ที่ผลิตจาก

เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ดังสมการที่ (2-3) และเมื่อทราบขนาดของผลกระทบที่เกิดขึ้นแล้ว ค่าต่างๆ เหล่านั้นจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อให้ความสำคัญแก่ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 5 ประเภท ซึ่งอัตราส่วนของความสำคัญ (Weighting Factor) ขึ้นอยู่กับผู้ประเมิน (นรรัตน์ รอดประเสริฐ, 2548) และรวมค่าของตัวชี้วัดทั้ง 5 ประเภท ให้เป็นคะแนนเดี่ยว (Single Score) (นงค์นุช พฤฒิชัยวิบูลย์, 2547) ดังสมการที่ (2-4)

$$Normalized\ effect\ score = Effect\ score / Normalization\ \ factor \quad (2\text{-}3)$$

$$Single\ score = \sum (Normalized\ effect\ score \times Weighting\ \ factor) \quad (2\text{-}4)$$

จากการศึกษาครั้งนี้ประสิทธิภาพของทางเลือก แต่ละทางเลือกที่นำมาใช้นั้นมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการนำมาใช้เพื่อลดมลสารชนิดใดเป็นหลัก อีกทั้งทางเลือกต่างๆ ที่นำมาใช้มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบข้างเคียงทั้งด้านบวก และด้านลบแตกต่างกัน ประสิทธิภาพของทางเลือกทั้งหมดที่นำมาใช้ และสามารถลดการเกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) ทั้งวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนได้มี แสดงดังภาพประกอบที่ 3-14



ภาพประกอบที่ 3-14 ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (Overall Environmental Impact) ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

ทางเลือกการนำพลังงานทดแทนซึ่งไม่มีการเผาไหม้เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) ทั้งวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนได้ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 53 เช่น การนำพลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าแทนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผลิตไฟฟ้าภายในโรงงานซึ่งก่อให้เกิดการเผาไหม้ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้พลังงานน้ำ และพลังงานลม ก็เป็นอีกทางเลือกของพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ และนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ การนำทางเลือกดังกล่าวมาใช้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานจากแหล่งพลังงานทดแทนที่นำมาใช้ และสัดส่วนของพลังงานทดแทนที่ผลิตในประเทศ สำหรับ Solar Cell เป็นแหล่งพลังงานที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ นำมาใช้ได้ทุกพื้นที่ หากโรงงานมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลก็ลดลง แต่ทั้งนี้ต้นทุนในการดำเนินการก็เป็นส่วนหนึ่งที่โรงงานให้

ความสำคัญเพราะต้นทุนของการนำ Solar Cell มาใช้มีสูง การหันมาลดมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นการจัดการที่มีความเป็นได้มากกว่าสำหรับผู้ประกอบจึงเป็นสิ่งสำคัญ เช่นการนำระบบ Gasification มาใช้ จากการศึกษา พบว่า ระบบการเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็งให้กลายเป็นก๊าซเพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานมีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวมได้ร้อยละ 19 โดยระบบ BIGCC ได้ถูกนำมาใช้ในโรงงานอยู่แล้วในปัจจุบันเพื่อลดการใช้น้ำมันเตาจากกระบวนการเผาปูนขาวร้อยละ 50 ซึ่งหากโรงงานให้ความสำคัญกับการนำระบบ BIGCC มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้มากขึ้นไม่เพียงแต่ลดมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพียงอย่างเดียว แต่สามารถลดการใช้น้ำมันเตาซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของมลสารต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ด้วย ดังนั้น ระบบ BIGCC จึงเป็นทางเลือกที่ควรให้ความสำคัญกับการนำมาใช้เพื่อลดการเกิดมลพิษซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) ลดลงจากการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนมากที่สุด เนื่องจากเป็นระบบที่มีอยู่ในโรงงาน ทำให้โรงงานสามารถปรับปรุง เปลี่ยนแปลงระบบการทำงานเพื่อให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นรองรับความต้องการการใช้พลังงานภายใต้กระบวนการผลิตของโรงงานได้ทั้งหมด

จากทางเลือกที่ศึกษา และนำมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสารที่เกิดขึ้นในกิจกรรมต่างๆ ในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่า ประสิทธิภาพของแต่ละทางเลือกมีค่าแตกต่างกันออกไป และหากมีการนำทางเลือกที่ศึกษามาใช้กับกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนเพื่อลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ จำเป็นจะต้องประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ก่อน เนื่องจาก ทางเลือกที่ศึกษาในครั้งนี้เป็นทั้งทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ได้จริงในปัจจุบัน และนำไปใช้ในอนาคต การประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนโดยใช้แบบจำลองในการวิจัยครั้งนี้ สามารถสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินทางเลือกต่างๆ รวมถึงผลกระทบข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการใช้ทางเลือก ได้ นอกจากนี้สามารถนำแบบจำลองไปใช้ประโยชน์เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ และการศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนได้ ซึ่งรายละเอียดของกรณีศึกษาต่างๆ ที่ผู้วิจัยนำมาศึกษาเพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในครั้งนี้ จะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.7

3.7 กรณีศึกษา (Case Study)

การนำแบบจำลองไปใช้ประโยชน์เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการกำหนดเงื่อนไขที่แตกต่างจากการประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนเบื้องต้น เป็นอีกกรณีศึกษาที่ผู้วิจัยได้นำมาศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งแบบจำลองที่นำหลักการ LCA มาใช้ร่วมกับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน (MCA) ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยนำมาศึกษากรณีศึกษา 3 กรณีที่

แตกต่างกัน คือ กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้เพื่อลดมลสารต่างๆ (Option Reduction) คือ ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมมีผลต่อการลดลงของมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบเป็นหลัก กรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ (Geography Scale of Impact) คือ การนำนโยบาย กฎหมาย ความคิดเห็นของโรงงาน หรือผู้ชำนาญการในด้านต่างๆ มาใช้เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน จากการศึกษาแม้ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกในแต่ละกรณีในกรณีศึกษานโยบายสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์มีความคล้ายคลึงกัน หรือเหมือนกัน แต่ผลจากการนำนโยบายมาพิจารณาทำให้ค่าผลกระทบโดยรวมที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีมีความแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับนโยบายที่นำมาพิจารณาเป็นหลัก นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษากรณีศึกษาความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนเพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนจากการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิง และวัตถุดิบในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน รายละเอียดแต่ละกรณีศึกษาจะได้กล่าวต่อไปนี้

3.7.1 กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ (Option Reduction)

คือ การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ เป็นสำคัญ ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับทางเลือกที่ถูกคัดเลือกมาใช้ แบ่งเป็น 3 กรณี คือ

3.7.1.1 กรณีอ้างอิง (No Option: M-Reference)

สำหรับกรณีอ้างอิง ผู้วิจัยกำหนดให้เป็นกรณีที่ไม่มีการจัดการใดๆ เกิดขึ้น (Worst Case) มลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง ไม่มีการควบคุม หรือการบำบัดภายใต้ขอบเขตที่นำมาศึกษา คือ ระบบย่อยการปลูกยูคาลิปตัส ระบบย่อยการผลิตเยื่อด้วยกระบวนคราฟท์ ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน และระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ดังนี้ ระบบย่อยการปลูกยูคาลิปตัสมีการใช้ปุ๋ยสำหรับเพาะเมล็ด และปลูกยูคาลิปตัสใช้น้ำมันดีเซล (Diesel) เพื่อการเก็บเกี่ยว และขนส่งไม้ยูคาลิปตัสเข้าสู่โรงงานเพื่อผลิตเป็นเยื่อยูคาลิปตัส ซึ่งกิจกรรมที่กล่าวมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำกิจกรรมถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมด เมื่อไม้ยูคาลิปตัสถูกส่งเข้าสู่โรงงานจะผ่านเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเพื่อผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์ เริ่มจากการแปรรูปไม้ให้เป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปล้างเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ก่อนนำไปต้มด้วย Na_2S และ NaOH เพื่อกำจัดลิกนิน (Lignin)

ซึ่งเป็นองค์ประกอบอินทรีย์ที่ให้ความแข็งอยู่ในเนื้อไม้ สารเคมีที่เกิดขึ้นจากการต้มเยื่อ คือ ของเหลวดำ (Black Liquor) จะถูกนำไปทำระเหย และเผาจนได้เป็นของเหลวเขียน (Smelt: Na_2S และ Na_2CO_3) และเข้าสู่กระบวนการทำด่าง (Causticizer) เพื่อนำกลับสารเคมี Na_2S และ NaOH ไปใช้ในการต้มชิ้นไม้ อีกครั้ง สำหรับกระบวนการนำกลับคืนสารเคมีที่ได้กล่าวมานี้กำหนดให้ไม่มีเทคนิคใดๆ ที่นำมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้น เยื่อที่ผ่านการต้มแล้วจะถูกนำมาฟอกเพื่อให้มีความขาว เหมาะแก่การนำไปใช้งาน การฟอกในที่นี้ใช้สารประกอบคลอรีน คือ ClO_2 (คลอรีนไดออกไซด์) ซึ่งมีขั้นตอนการฟอกหลายขั้นตอน ได้แก่ (D-E_{op}-D-D) D = Chlorine Dioxide = (ClO_2) , E_{op} = ใช้ Sodium Hydroxide (NaOH) ร่วมกับ ก๊าซออกซิเจน (O_2) และสารละลาย Hydrogen peroxide (H_2O_2) เป็นตัวทำปฏิกิริยา เยื่อกระดาษที่ผ่านการฟอกแล้วจะถูกล้างและเข้าสู่การผลิตกระดาษต่อไป สำหรับพลังงานที่นำมาใช้ส่วนใหญ่ในกระบวนการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์ร้อยละ 90 มาจากการผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งเชื้อเพลิงหลักที่นำมาใช้ คือ เปลือกไม้ และเศษชิ้นไม่ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส การผลิตพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังกล่าว ก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสารชนิดต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง เนื่องจาก ไม่มีการควบคุม รวมถึงการกำจัดมลสารที่ปนเปื้อนมากับก๊าซก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ไม่เพียงแต่ระบบย่อยการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์เท่านั้นที่ใช้พลังงานในปริมาณมาก ระบบย่อยการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนก็เช่นเดียวกัน เนื่องจาก เยื่อที่ถูกขึ้นแผ่นแล้วจะต้องทำให้แห้งก่อนในกิจกรรมการอบแผ่นกระดาษซึ่งต้องอาศัยเชื้อเพลิงจำนวนมากในการต้มหม้อน้ำเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปอบกระดาษ น้ำเสียปริมาณมากที่เกิดขึ้นจากระบบย่อยการผลิตเยื่อ และกระดาษ ในกรณีอ้างอิงเป็นอีกแหล่งสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำซึ่งกรณีอ้างอิงกำหนดให้ไม่มีระบบการจัดการ หรือระบบการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น ส่วนระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งานแบ่งการกำจัดออกเป็น 3 แบบ คือ ฝังกลบ เทกองกลางแจ้ง และเผา ผู้วิจัยกำหนดให้ไม่มีระบบการจัดการ รวมถึงควบคุมมลสารที่เกิดขึ้นวิธีการกำจัดทั้ง 3 วิธี ดังตารางที่ 3-10

3.7.1.2 กรณีปัจจุบัน (Current Practice: M-Current)

คือ ทางเลือกที่โรงงานผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ และกระดาษพิมพ์เขียน ใช้อยู่ในปัจจุบันเพื่อลดการปลดปล่อยมลพิษจากกิจกรรมต่างๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต โดยผู้วิจัยใช้แบบสอบถาม (ดังภาคผนวก ข) เพื่อขอความอนุเคราะห์ข้อมูลจากโรงงาน รายละเอียดทางเลือกที่สอบถามจากทางโรงงาน มาจากการศึกษาทางเลือกเพื่อลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ จากการประเมินเบื้องต้น ข้อมูลที่ได้จัดเป็นข้อมูลที่ดีที่สุด ที่ผู้วิจัยมีอยู่ในขณะนี้ เพื่อนำมาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมกับแบบจำลอง ทางเลือกต่างๆ ที่ทางโรงงาน

นำมาใช้ แสดงไว้ดังตารางที่ 3-10 ส่วนระบบย่อยการจัดการหลังหมดอายุการใช้งาน ผู้วิจัยพิจารณาทางเลือกที่มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดที่มีอยู่ในแต่ละกิจกรรมมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น สำหรับระบบย่อยการปลูกป่ายูคาลิปตัสเป็นระบบที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับระบบย่อยอื่นๆ การประเมินจึงเหมือนกับกรณีอ้างอิงซึ่งไม่มีทางเลือกในการลดมลสารต่างๆ

3.7.1.3 กรณีพิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุดจากการศึกษา (Best Available Option: M-Max)

คือ คัดเลือกทางเลือกเพียงทางเลือกเดียวที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละกิจกรรม โดยพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นโดยรวม (Overall) ในแต่ละกิจกรรม เพื่อนำมาคัดเลือกทางเลือกที่สามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) ได้มากที่สุด ทางเลือกต่างๆ ที่ผู้วิจัยคัดเลือกมาใช้กับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกรณีนี้ แสดงดังตารางที่ 3-10 สำหรับระบบย่อยการปลูกป่ายูคาลิปตัสเป็นระบบที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับระบบย่อยอื่นๆ การประเมินจึงเหมือนกับกรณีอ้างอิงซึ่งไม่มีทางเลือกในการลดมลสารต่างๆ

ตารางที่ 3-10 ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกของกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ และกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์

กิจกรรม	ตัวย่อทางเลือก	กรณีอ้างอิง	กรณีปัจจุบัน	M-Max	นโยบายสิ่งแวดล้อม		
					M-Global	M-Regional	M-Local
ต้มเยื่อ	STRIP		✓				
	LQ_SCRUB		✓	✓	✓	✓	✓
	IN_DIGES						
	AT_CARBON						
เผาไหม้ชีวมวล	NG_BIOMS						
	SLA_H						
	SLA_E			✓	✓	✓	✓
	BIGCC		*				
	LNB		✓				
เผาไหม้ของเหลวดำ	OFA		✓				
	BLGCC						
	H_SOLID		✓	✓	✓	✓	
	EP		✓				✓
	CYCLONE						
	BAG						
เผาไหม้น้ำมันเตา	NG_BKOIL			✓	✓	✓	
	SCRUB		✓				✓
	SCR						
	SNCR						
รีดน้ำออก	ADD_VACUUM		✓	✓		✓	✓
	RE_FELTWT		✓				
	REP_GLAND		✓				
	SPILL		✓				
	RE_SEALWT		✓		✓		

ตารางที่ 3-10 ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกของกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ และกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ (ต่อ)

กิจกรรม	**ตัวย่อทางเลือก**	**กรณีอ้างอิง**	**กรณีปัจจุบัน**	**M-Max**	**นโยบายสิ่งแวดล้อม M-Global**	**นโยบายสิ่งแวดล้อม M-Regional**	**นโยบายสิ่งแวดล้อม M-Local**
บำบัดน้ำเสีย	AS		✓				
	AL			✓	✓	✓	✓
ฝังกลบ	GAS_TM		✓	✓	✓	✓	✓
	LAND_OP						
เทกองกลางแจ้ง	RE_COMBUS						
	IN_REP_OPEN		✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ * หมายถึง ระบบ BIGCC ที่โรงงานนำมาใช้กับเตาเผาในหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีเพื่อลดการใช้น้ำมันเตาร้อยละ 50 ในการเผาปูนขาว

3.7.2 ผลการประเมินกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ (Option Reduction)

จากการนำแบบจำลองมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ พบว่า กรณีอ้างอิง (M-Reference) ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทุกประเภทมากที่สุดจากกิจกรรม 9 กิจกรรมสำคัญที่ปลดปล่อยมลสาร และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 3-11 เนื่องจากเป็นกรณีที่ไม่มีการนำแนวทางการจัดการใดๆ มาใช้เพื่อลดการเกิดมลสารในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ในขณะที่กรณีปัจจุบัน และกรณีที่ดีที่สุดมีการนำทางเลือกต่างๆ มาใช้ในการลดมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน โดยทางเลือกต่างๆ ที่นำมาใช้ในกรณีปัจจุบัน (M-Current) ผู้วิจัยใช้การสอบถามจากโรงงานโดยใช้แบบสอบถามดังภาคผนวก ค สำหรับกรณีทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max) ทางเลือกที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมผู้วิจัยคัดเลือกทางเลือกจากทั้งหมด 30 ทางเลือกที่ได้จากการศึกษา โดยพิจารณาทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละกิจกรรมมาใช้เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ผลที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

3.7.2.1 ผลกระทบสภาวะโลกร้อน

จากการประเมินโดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีอ้างอิง (M-Reference) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนมากที่สุดจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) โดยเฉพาะ CO_2 จากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตาออกสู่สิ่งแวดล้อมมากถึงร้อยละ 26 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด รองลงมา คือ กรณีทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นทางเลือกที่นำมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยฝุ่นละอองออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยปลดปล่อย CO_2 คิดเป็นร้อยละ 54 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด 489,399 ton-CO_2/yr ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) เนื่องจากมีการนำระบบ BIGCC มาใช้ซึ่งส่งผลต่อการลดการใช้น้ำมันเตาได้ร้อยละ 50 มลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้น้ำมันเตาจึงมีค่าลดลงเท่ากับ 177,732 ton-CO_2/yr หรือคิดเป็นร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง เป็นผลให้ทางเลือกต่างๆ ที่โรงงานนำมาใช้ในปัจจุบันสามารถลดผลกระทบสภาวะโลกร้อนได้มากที่สุด ดังตารางที่ 3-11

3.7.2.2 ผลกระทบสภาวะฝนกรด

ผลการประเมิน พบว่า กรณีอ้างอิง (M-Reference) เกิดการปลดปล่อยของมลสารต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดมากที่สุดคิดเป็น 12,646 ton-SO_2/yr ซึ่งมลสารตัวสำคัญที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุด คือ SO_2 เท่ากับ 5,484 ton-SO_2/yr จากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตา รองลงมา คือ กรณีปัจจุบัน (M-Current) เป็นกรณีที่มีการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเท่ากับ 3,343 ton-SO_2/yr โดยมี NO_x เป็นมลสารตัวสำคัญ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเท่ากับ 1,115 ton-NO_x/yr ในขณะที่กรณีทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max) ได้นำทางเลือกพลังงานทดแทนมาใช้เพื่อการผลิตพลังงานทำให้มลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลลดลง โดยเฉพาะมลสาร NO_x ซึ่งเป็นมลสารตัวสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะฝนกรด เป็นผลให้การปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบการเกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดลดลงร้อยละ 36 เมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน (M-Current) ดังตารางที่ 3-11

3.7.2.3 ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น

การประเมินผลกระทบ พบว่า กรณีอ้างอิง (M-Reference) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นมากที่สุดคิดเป็น 9,254 ton-PO_4^{3-}/yr โดยมี P (Phosphorus) เป็นสาเหตุหลักที่ปลดปล่อยจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเท่ากับ 840 ton-P/yr ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นลดลงจากกรณีอ้างอิงคิดเป็นร้อยละ 62 เนื่องจาก มีการนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge: AS) มาใช้ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด P ได้มาก

ถึงร้อยละ 70 (DIW, 1999) น้ำเสียจากกระบวนการผลิตกระดาษมีปริมาณธาตุอาหาร เช่น P น้อย (Tiina *et al.,* 2008) ไม่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งมีหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงต้องมีการเติม P ในระบบเพื่อเป็นอาหารแก่จุลินทรีย์ทำให้เกิดการตกค้างของ P ออกสู่สิ่งแวดล้อม สำหรับกรณีศึกษาทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max) มีการนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon: AL) มาใช้ซึ่งมีประสิทธิภาพมนการบำบัด P ได้มากถึงร้อยละ 80 (DIW, 1999) ทำให้ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นลดลงร้อยละ 11 เมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน ดังตารางที่ 3-11

3.7.2.4 ผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากกรณีต่างๆ โดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีอ้างอิง (M-Reference) ปลดปล่อยมลสาร และส่งผลกระทบต่อสภาวะหมอกควันพิษมากที่สุดเท่ากับ 4,795 ton-C_2H_4/yr ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษคิดเป็น 4,544 ton-C_2H_4/yr ซึ่งมีสาเหตุมาจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานจากระบบย่อยการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์เป็นหลัก (Sara *et al.,* 2009) โดยมีมลสาร CO เป็นมลสารที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดคิดเป็น 74,304 ton-CO/yr สำหรับกรณีศึกษาทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max) ผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษลดลงร้อยละ 89 เมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน เนื่องจาก การผลิตพลังงานไฟฟ้าภายใต้กระบวนการผลิตมีการนำพลังงานทดแทน (แสงอาทิตย์) มาใช้ ซึ่งลดการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลได้ทั้งหมด ทำให้ปริมาณมลสารต่างๆ โดยเฉพาะ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลลดลง ส่งผลให้ผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษลดลง ดังตารางที่ 3-11

3.7.2.5 ผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีอ้างอิง (M-Reference) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เท่ากับ 35,174 ton-DCB/yr โดยเฉพาะ ฝุ่นละออง (Particulates) จากกิจกรรมการเผาไหม้ของเหลวดำของหม้อต้มไอน้ำนำกลับคืนสารเคมีเกิดฝุ่นละอองเท่ากับ 16,000 ton-Particulates/yr ซึ่งหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีเป็นหน่วยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากในการผลิตเยื่อกระดาษ (Jawjit *et al.,* 2006) ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เท่ากับ 5,395 ton-DCB_2/yr โดยมีสาเหตุหลักมาจากมลสาร NO_x จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์เท่ากับ 1,115 ton-NO_x/yr สำหรับกรณีทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max) ผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน เนื่องจากปัจจุบันมีการนำ

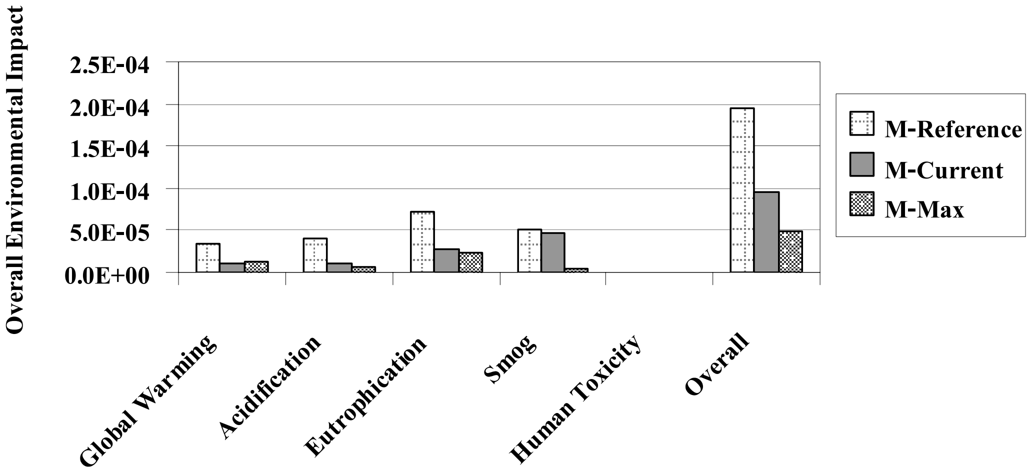
เครื่องกำจัดฝุ่นฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator: ESP) มาใช้ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฝุ่นละอองได้ร้อยละ 95 (นพภาพร และคณะ, 2547) ทำให้ปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำถูกกำจัดได้ทั้งหมด ผลที่ได้จึงทำให้ผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เพิ่มขึ้นร้อยละ 65 เมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน ดังตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Impact Score) ที่เกิดขึ้นของกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ จาก 9 กิจกรรมสำคัญ

ประเภทผลกระทบ	มลสาร	กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ		
		M-Reference	M-Current	M-Max
Global Warming (ton CO_2/yr)	CO_2	366,196	187,638	276,265
	CH_4	878,958	160,709	139,772
	N_2O	36,426	35,891	2,241
Acidification (ton SO_2/yr)	SO_2	7,084	594	320
	NO_x	3,434	1,946	1,013
	TRS	1,328	3	15
Eutrophication (ton PO_4^{3-}/yr)	COD	2,653	438	696
	P	5,514	2,275	1,813
	NO_x	629	356	185
Smog (ton C_2H_4/yr)	CO	3,488	3,488	122
	NMVOC	818	813	168
	CH_4	229	42	36
	NO_x	135	77	40
Human Toxicity (ton $C_6H_4Cl_2$/yr)	TRS	155	0.37	1.76
	NO_x	5,805	3,289	1,712
	SO_2	680	57	31
	Particulates	27,880	1,394	13,120

3.7.2.6 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall Impact Score)

ผลกระทบแต่ละประเภทที่ถูกทำให้เป็นค่าปกติ (Normalized) และผ่านการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting) ซึ่งกรณีศึกษาในที่นี้ผู้วิจัยให้ความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั้ง 5 ประเภท เท่ากันทั้งหมด พบว่า กรณีอ้างอิง (M-Reference) ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) มากที่สุดเท่ากับ 1.94E-04 เนื่องจากเป็นกรณีที่ไม่มีการจัดการใดๆ ทำให้มลพิษ และของเสียต่างๆ ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวมเท่ากับ 9.61E-05 และกรณีทางเลือกที่ดีที่สุด (M-Max) ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด คือ 4.83E-05 ดังภาพประกอบที่ 3-15 เนื่องจากผลกระทบสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่เป็นผลมาจากมลสารต่างๆ ที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะฝนกรด ดังนั้น ทางเลือกที่ศึกษา และนำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ จึงสามารถลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่ส่งผลก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะฝนกรดเป็นส่วนใหญ่ผลที่ได้จึงทำให้ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกรณีทางเลือกที่ดีที่สุดเกิดขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิงซึ่งไม่มีการจัดการใดๆ และกรณีปัจจุบันที่ทางเลือกส่วนใหญ่ไม่ได้เน้นเฉพาะมลสารต่างๆ ที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะฝนกรด เท่านั้น



ภาพประกอบที่ 3-15 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง (กรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการนำทางเลือกมาใช้ในการลดมลสารต่างๆ)

3.7.3 กรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ (Geographical Scale)

คือ การนำนโยบายสิ่งแวดล้อมมาพิจารณาเพื่อประเมินผลกระทบโดยรวม (Overall) ที่เกิดขึ้นจากวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนจากการให้ความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกันออกไป (Hermann *et al.,* 2007) โดยเทียบขนาดความรุนแรงของผลกระทบแต่ละประเภทกับระดับการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์

3.7.3.1 พิจารณาให้น้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ ในระดับโลก (Global Problems: M-Global)

วัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ คัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถลดผลกระทบสภาวะโลกร้อนในแต่ละกิจกรรม เพียงทางเลือกเดียว หากทางเลือกที่นำมาใช้ทั้งหมดในแต่ละกิจกรรม ไม่มีผลต่อการลดก๊าซเรือนกระจก หรือเท่ากับศูนย์ (0) ผู้วิจัยเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) ในแต่ละกิจกรรมมาใช้แทน เพื่อประเมินกับแบบจำลอง ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกแสดงไว้ดังตารางที่ 3-10

3.7.3.2 พิจารณาให้น้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ในระดับภูมิภาค (Regional Problems: M-Regional)

วัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ คัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพียงทางเลือกเดียวที่สามารถลดผลกระทบสภาวะฝนกรดได้มากที่สุดในแต่ละกิจกรรม หากทางเลือกต่างๆ ที่นำมาใช้ในแต่ละกิจกรรมไม่มีผลต่อการลดลงของผลกระทบสภาวะฝนกรด หรือเท่ากับศูนย์ (0) ผู้วิจัยพิจารณาคัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) ของแต่ละกิจกรรมแทน แสดงไว้ดังตารางที่ 3-10

3.7.3.3 พิจารณาให้น้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ในระดับท้องถิ่น (Local Problems: M-Local)

วัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ คัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพียงทางเลือกเดียวที่สามารถลดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้มากที่สุดในแต่ละกิจกรรม หากทางเลือกต่างๆ ที่นำมาใช้ในแต่ละกิจกรรมไม่มีผลต่อการลดลงของผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ หรือเท่ากับศูนย์ (0) ผู้วิจัยพิจารณาคัดเลือกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) ของแต่ละกิจกรรมแทน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-10

3.7.4 ผลการประเมินกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ (Geographical Scale)

ผลการประเมินกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ จากการกำหนดหลักเกณฑ์การคัดเลือกทางเลือกต่างๆ ที่ศึกษาจากระดับความรุนแรงของผลกระทบที่ส่งผลตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ ทำให้การคัดเลือกทางเลือกขึ้นอยู่กับลำดับความสำคัญของผลกระทบที่สอดคล้องกับนโยบายแต่ละประเภท (Hermann *et al.,* 2008) โดยนโยบายทางสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันมีผลต่อการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting) กับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ ในระดับที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งมีผลต่อการเกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) ผลกระทบแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นจากการคัดเลือกทางเลือกตามนโยบายที่แตกต่างกัน ดังจะกล่าวต่อไปนี้ ซึ่งในตารางที่ 3-12 ผู้วิจัยคัดเลือกเฉพาะมลสารหลักที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากกิจกรรม 9 กิจกรรมสำคัญมาแสดงให้เห็นเท่านั้น

3.7.4.1 ผลกระทบสภาวะโลกร้อน

จากการประเมิน พบว่า กรณีให้ความสำคัญกับผลกระทบที่เกิดขึ้นในระดับโลก (M-Global) ภูมิภาค (M-Regional) และท้องถิ่น (M-Local) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลกระทบตามลำดับ เนื่องจาก การจัดลำดับความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์โดยระดับโลกให้ความสำคัญกับสภาวะโลกร้อนมากที่สุด ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกจึงส่งผลต่อการลดมลสารก๊าซเรือนกระจกเป็นส่วนใหญ่เมื่อเทียบกับผลกระทบระดับภูมิภาค และระดับท้องถิ่นซึ่งให้ความสำคัญกับผลกระทบสภาวะโลกร้อนน้อยกว่า ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนน้อยที่สุด เนื่องจาก ปัจจุบันมีการนำระบบ Gasification มาใช้ซึ่งช่วยลดการเผาไหม้น้ำมันเตาซึ่งเป็นแหล่งสำคัญที่ปลดปล่อยมลสาร CO_2 ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ร้อยละ 50 ดังตารางที่ 3-12

3.7.4.2 ผลกระทบสภาวะฝนกรด

ผลการประเมิน พบว่า การให้ความสำคัญกับผลกระทบระดับท้องถิ่น (M-Local) ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดมากที่สุดเท่ากับ 3,860 ton-SO_2/yr ดังตารางที่ 3-12 ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการปลดปล่อยมลสาร SO_2 จากกิจกรรมการเผาไหม้ของเหลวดำปริมาณ 1,600 ton-SO_2/yr ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) มลสารต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดลดลงร้อยละ 13 เมื่อเทียบกับกรณีผลกระทบระดับท้องถิ่น เนื่องจาก ปัจจุบันได้นำเทคนิคการเพิ่มความเข้มข้นของของเหลวดำซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดมลสาร SO_2 ได้ร้อยละ 80 (Poyry, 1992) สำหรับกรณีให้ความสำคัญกับผลกระทบในระดับโลก (M-Global) และระดับภูมิภาค (M-Regional) เกิดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเท่ากัน คือ 2,147

ton-SO_2/yr ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีผลกระทบระดับท้องถิ่น และกรณีปัจจุบัน เนื่องจาก นำทางเลือกพลังงานทดแทน (พลังงานแสงอาทิตย์) มาใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้าซึ่งลดมลสาร NO_x จากการเผาไหม้น้ำมันเตา และเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลได้ทั้งหมด (UNEP, 2005)

3.7.4.3 ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น

ผลการประเมิน พบว่า การให้ความสำคัญกับผลกระทบตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ระดับโลก (M-Global) ระดับภูมิภาค (M-Regional) และระดับท้องถิ่น (M-Local) ปลดปล่อยมลสารซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นลดลงตามลำดับ คือ 3,252 ton-PO_4^{3-}/yr 3,153 ton-PO_4^{3-}/yr และ 3,131 ton-PO_4^{3-}/yr จากผลที่ได้ปริมาณ P ที่ถูกปลดปล่อยจาก 3 กรณีมีปริมาณเท่ากันคือ 1,813 ton-PO_4^{3-}/yr แต่ค่า COD และ NO_x ซึ่งมีส่วนในการเกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นมีค่าแตกต่างกันจึงเป็นผลให้ค่าผลกระทบที่ได้แตกต่างกัน แม้ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกมาใช้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีการให้ความสำคัญกับผลกระทบตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ในระดับต่างๆ ดังตารางที่ 3-12 เนื่องจาก กรณีปัจจุบันใช้ระบบบำบัดน้ำเสียตะกอนเร่ง (AS) เป็นทางเลือกซึ่งมีประสิทธิภาพในการลด P น้อยกว่าระบบบ่อเติมอากาศ (AL) ร้อยละ 10 (DIW, 1999) ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงกว่ากรณีการให้ความสำคัญกับผลกระทบตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ในระดับโลก ระดับภูมิภาค และระดับท้องถิ่น

3.7.4.4 ผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ

กรณีปัจจุบัน (M-Current) ส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษมากที่สุดเท่ากับ 4,544 ton-C_2H_4/yr ดังตารางที่ 3-12 โดยมีมลสาร CO จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์เป็นมลสารหลักที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดเท่ากับ 74,304 ton-CO/yr จากการสอบถามโรงงาน พบว่า พลังงานไฟฟ้าที่โรงงานผลิตเยื่อ และกระดาษนำมาใช้มาจากการผลิตไฟฟ้าภายใต้กระบวนการผลิต โดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และน้ำมันเตาเพื่อผลิตไอน้ำและปั่นไฟฟ้าสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถใช้ในการผลิตของโรงงานได้ทั้งหมด และมีเหลือสำหรับขายแก่โรงไฟฟ้าได้ ส่วนกรณีการให้ความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ พบว่า การให้ความสำคัญกับผลกระทบระดับท้องถิ่น (M-Local) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษน้อยที่สุดเท่ากับ 491 ton-C_2H_4/yr เนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นในระดับท้องถิ่นจัดลำดับความสำคัญของผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษอยู่ในลำดับที่ 2 ซึ่งเมื่อเทียบกับผลกระทบระดับโลก (M-Global) และระดับภูมิภาค (M-Regional) ที่ให้ความสำคัญกับผลกระทบดังกล่าวน้อยกว่า ในลำดับที่ 3 และ 4 ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกส่วนใหญ่มี

ผลต่อการลดมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษมากกว่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลง

3.7.4.5 ผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์

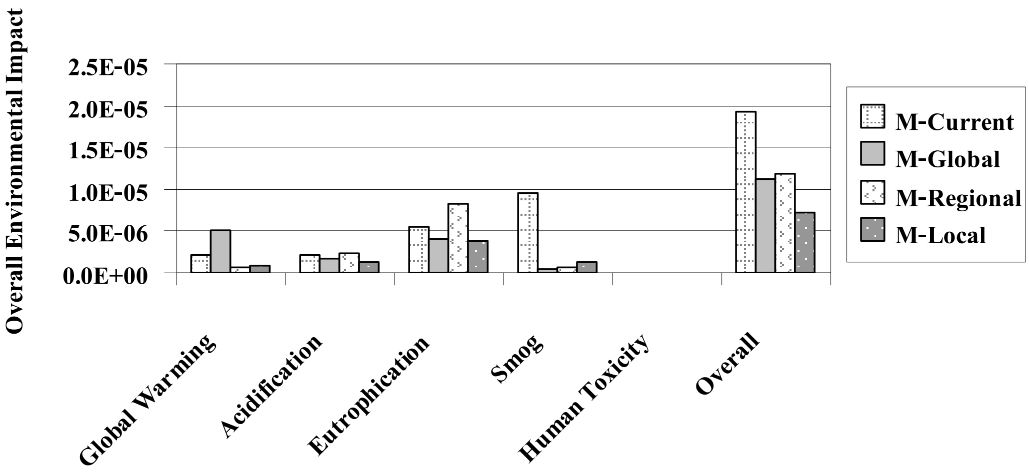
จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม พบว่า การให้ความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ในระดับโลก (M-Global) และระดับภูมิภาค (M-Regional) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์มากที่สุดเท่ากัน คือ 15,518 ton-DCB/yr ดังตารางที่ 3-12 ส่วนกรณีปัจจุบัน (M-Current) ก่อให้เกิดผลกระทบเท่ากับ 5,395 ton-DCB/yr เป็นผลมาจากการนำเครื่องดักฝุ่นไฟฟ้าสถิต (ESP) มาใช้ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดักฝุ่นมากถึงร้อยละ 95 (นพภาพร และคณะ, 2547) เช่นเดียวกับกรณีการให้ความสำคัญกับผลกระทบตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ระดับท้องถิ่น (M-Local) ซึ่งให้ความสำคัญกับผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์มากที่สุด เป็นผลให้ทางเลือกที่นำมาใช้ส่วนใหญ่มีผลต่อการลดมลสารต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดผลกะทบดังกล่าว ผลที่ได้จึงทำให้ผลกระทบมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 3,030 ton-DCB/yr เมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ ในกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์

3.7.4.6 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall Impact Score)

จากการนำแบบจำลองมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น พบว่ากรณีปัจจุบัน (M-Current) ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) เท่ากับ 1.92E-05 ส่วนกรณีให้ความสำคัญกับผลกระทบที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ในระดับโลก (M-Global) ระดับภูมิภาค (M-Regional) และระดับท้องถิ่น (M-Local) มีค่าเท่ากับ 1.12E-05 1.19E-05 และ 7.25E-06 ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 3-16 ผลที่ได้เป็นผลมาจากนโยบายสิ่งแวดล้อมที่นำมาพิจารณา จะเห็นได้ว่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกัน แม้ทางเลือกที่ถูกคัดเลือกมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจะมีความคล้ายคลึงกัน แต่เพราะนโยบายสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันเป็นตัวกำหนดค่าการให้น้ำหนักความสำคัญของผลกระทบแต่ละประเภท ส่งผลให้ผลกระทบโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 3-12 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Impact Score) ที่เกิดขึ้นในกรณีปัจจุบัน และกรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์จาก 9 กิจกรรมสำคัญ

ประเภทผลกระทบ	มลสาร	M-Current	กรณีศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์		
			M-Global	M-Regional	M-Local
Global Warming ($ton\ CO_2/yr$)	CO_2	187,638	275,913	276,265	366,196
	CH_4	160,709	139,684	139,772	139,503
	N_2O	35,891	2,171	2,241	2,870
Acidification ($ton\ SO_2/yr$)	SO_2	594	320	320	2,149
	NO_x	1,946	1,013	1,013	894
	TRS	3	15	15	18
Eutrophication ($ton\ PO_4^{3-}/yr$)	COD	438	795	696	697
	P	2,275	1,813	1,813	1,813
	NO_x	356	185	185	164
Smog ($ton\ C_2H_4/yr$)	CO	3,488	122	122	120
	NMVOC	813	168	168	169
	CH_4	42	36	36	36
	NO_x	77	40	40	35
Human Toxicity (ton DCB/yr)	TRS	0.37	1.76	1.76	2.08
	NO_x	3,289	1,712	1,712	1,511
	SO_2	57	31	31	206
	Particulates	1,394	13,120	13,120	656



ภาพประกอบที่ 3-16 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง (กรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์)

จากการประเมินเห็นได้ว่า แบบจำลองสามารถนำนโยบายสิ่งแวดล้อมมาพิจารณาเพื่อประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งหากโรงงานมีนโยบายที่แตกต่างจากนโยบายที่ผู้วิจัยนำมาเสนอในครั้งนี้ ก็สามารถนำมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมกับแบบจำลองได้ เช่น นโยบายทางการเมือง นโยบายทางสังคม นโยบายทางเศรษฐกิจ หรือแม้แต่ความคิดเห็นส่วนตัวของผู้ประเมิน ก็สามารถนำเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมกับแบบจำลองได้

ระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์เปรียบเทียบได้กับนโยบายสิ่งแวดล้อมที่นำมาพิจารณาเพื่อคัดเลือกทางเลือกในครั้งนี้ ซึ่งมีผลต่อการประเมินในขั้นตอนของการให้น้ำหนักความสำคัญ กล่าวคือ เมื่อค่าการปลดปล่อยมลสารต่างๆ (Emission Score) ถูกจัดเข้ากลุ่มผลกระทบแต่ละประเภทกลายเป็นค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Impact Score) โดยส่วนใหญ่การประเมินจะทำถึงขั้นตอนนี้ (คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิต และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ, 2549) แต่เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบ หรือรวมกัน ค่าผลกระทบจะต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นค่าปกติ (Normalization) ก่อน ซึ่งค่าที่ได้หลังจากทำให้เป็นค่าปกติแล้ว เรียกว่า Normalized Impact Score ถูกนำรวมกันเป็นผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมดที่เกิดขึ้น เรียกว่า Overall Environmental Impact หรือ คะแนนเดี่ยว (Single Score) ดังสมการที่ (2-4) โดยการนำมาผ่านขั้นตอนการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting Method) ซึ่งขั้นตอนนี้สามารถนำประเด็นทางการเมือง สังคม รวมถึงความคิดเห็นส่วนตัวเข้ามาเกี่ยวข้องได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้วิจัย ซึ่งตัวคูณการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting Factor) ของกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ มีค่าแตกต่างกันออกไป โดยผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

ตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ในระดับโลก (Global Perspective) ระดับภูมิภาค (Regional Perspective) และระดับท้องถิ่น (Local Perspective) มีลำดับความสำคัญของผลกระทบสิ่งแวดล้อมดังนี้ ระดับโลก (GW>AD>EP>SM>HT) ระดับภูมิภาค (AD,EP>SM,HT>GW) และระดับท้องถิ่น (HT>SM>EP>AD>GW) (Hermann *et al.,* 2006)

$$Overall = \sum (Normalized\ \ impact\ \ score \times Weighting\ \ factor) \qquad (2\text{-}4)$$

ค่าตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้การคำนวณด้วยวิธี The Analytical Hierarchy Process: AHP เป็นวิธีการกำหนดสัดส่วนน้ำหนักคะแนนของแต่ละผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอื่นแบบจับคู่ (DIFOR, 1999) ดังภาคผนวก ง ผลรวมของการให้น้ำหนักผลกระทบทั้ง 5 ประเภทเท่ากับ 1 ซึ่งจากเดิมกรณีปัจจุบัน (M-Current) ผู้วิจัยกำหนดให้ผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้ง 5 ประเภทมีค่าเท่ากันทั้งหมด คือ 1 แต่เมื่อนำกรณีปัจจุบันมาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ น้ำหนักผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่มีค่าเท่ากันจะต้องหารด้วยห้า (5) เพื่อรวมค่าน้ำหนักผลกระทบที่ได้ทั้งหมดให้เท่ากับ 1 เหมือนกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ ดังตารางที่ 3-13 การให้น้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันนำไปสู่การได้มาซึ่งผลกระทบโดยรวม (Overall) ที่มีค่าแตกต่างกันออกไปตามลำดับการให้น้ำหนักความสำคัญที่นำมาพิจารณา ซึ่งหมายถึง นโยบายสิ่งแวดล้อมที่นำมาพิจารณามีส่วนสำคัญในการกำหนดค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั้งหมด ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน เช่น หากโรงงานในประเทศไทยมีนโยบายสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน แต่เทคนิค หรือทางเลือกต่างๆ ที่นำมาใช้ในการผลิตมีเหมือนกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นก็มีความแตกต่างกันได้ เพราะ มีนโยบายสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป สำหรับผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์ผลกระทบที่เกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ที่นำมาพิจารณา

ตารางที่ 3-13 ตัวคูณการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) กรณีปัจจุบัน และกรณีศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ของแต่ละผลกระทบ

ประเภทผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	ตัวคูณการให้น้ำหนักความสำคัญ			
	M-Current	**M-Global***	**M-Regional***	**M-Local***
โลกร้อน	0.2	0.42	0.06	0.06
ฝนกรด	0.2	0.26	0.34	0.10
ยูโทรฟิเคชั่น	0.2	0.16	0.34	0.16
หมอกควันพิษ	0.2	0.09	0.13	0.26
ความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์	0.2	0.06	0.13	0.42

ที่มา : * Hermann *et al.* (2007)

3.7.5 กรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Sensitivity Analysis)

คือ การศึกษาวิธีการจัดการโดยการปรับปรุง หรือเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิง และวัตถุดิบในการผลิตเพื่อลดการเกิดของเสีย รวมถึงมลสารต่างๆ ซึ่งวิธีการจัดการ การเกิดของเสียเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการพิจารณานำมาใช้กับการลดการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งลดการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมปลายทาง รวมถึงค่าใช้จ่ายๆ ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการหาวิธีการแก้ไข รวมถึงลดการเกิดมลพิษต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากการบำบัดได้ด้วย (Hospido *et al.,* 2000 and Sven *et al.,* 2005)

3.7.5.1 การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (Replacement of Bunker Oil by Biomass: M-Fuel)

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อ และกระดาษเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก (DIW, 1999) น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่โรงงานผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์นำมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงกับเตาเผาในหน่วยนำกลับคืนสารเคมีก่อให้เกิดมลสารต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมากจากการประเมินเบื้องต้น โดยเฉพาะผลกระทบสภาวะโลกร้อน เทคนิคการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปริมาณการใช้น้ำมันเตาลงได้ แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัส และกระดาษพิมพ์เขียนมีเปลือกไม้ และเศษไม้เป็นจำนวนมากจากการเตรียมวัตถุดิบก่อนนำมาผลิต ซึ่งหากสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อแทนที่น้ำมันเตาซึ่งปลดปล่อยมล

สาร CO_2 เป็นจำนวนมาก ในขณะที่มลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลจะถูกคิดกลับเข้าสู่วัฏจักรการเจริญเติบโตของต้นยูคาลิปตัส ผู้วิจัยจึงนำมาใช้เพื่อศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นโดยนำมาแทนที่ในสัดส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 เนื่องจาก เชื้อเพลิงที่มีอยู่ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการผลิตพลังงงานเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้ในโรงงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อ ดังนั้น ส่วนที่เหลือจากการผลิตพลังงานจึงสามารถนำมาใช้แทนที่น้ำมันเตาได้ โดยนำมาแทนที่ที่กำลังการผลิตเยื่อยูคาลิปตัส และกระดาษพิมพ์เขียน 800,000 ตัน/ปี และ 1,000,000 ตัน/ปี ค่าตัวคูณมลพิษ (Emission Factor) ของน้ำมันเตา และเชื้อเพลิงชีวมวล แสดงดังตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-14 ค่าตัวคูณมลพิษ (Emission Factor) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล และน้ำมันเตา

ประเภทผลกระทบ	**มลสาร**	**Emission Factor**[1]		**หน่วย**
		ชีวมวล	**น้ำมันเตาเกรดเอ**	
Global Warming	CO_2	110	77.4	Ton/TJ
	CH_4	30	2	Kg/TJ
	N_2O	4	0.6	Kg/TJ
Acidification	SO_2	-	1,195	Kg/TJ
	NO_x	100	200	Kg/TJ
	TRS	-	-	-
Eutrophication	COD	-	-	-
	P	-	-	-
	NO_x	100	200	Kg/TJ
Smog	CO	4,000	10	Kg/TJ
	NMVOC	50	5	Kg/TJ
	CH_4	-	-	-
	NO_x	100	200	Kg/TJ
Human Toxicity	TRS	-	-	-
	NO_x	100	200	Kg/TJ
	SO_2	-	-	-
	Particulates	1[2]	-	Kg/Ton

ที่มา : [1] IPCC (1997) and [2] EC (2001)

3.7.5.2 การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่ (Waste Paper Recycling: M-Recycle)

การนำกระดาษเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เป็นอีกแนวทางการจัดการที่นำมาใช้ในการประเมินเพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณากระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 20 มาผลิตกระดาษแทนการใช้เยื่อจากยูคาลิปตัสทั้งหมด ภายใต้กำลังการผลิตเยื่อ 800,000 ตัน/ปี และกำหนดให้ขั้นตอนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีกำลังการผลิตที่ 1,000,000 ตัน/ปี กระบวนการผลิตกระดาษด้วยกระดาษเสีย ก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 3-15 โดยทั่วไปการนำกระดาษเสียมาผลิตกระดาษพิมพ์เขียนแทนการใช้เยื่อผลิตในสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 1.2 เนื่องจาก กระดาษที่ผลิตได้มีคุณภาพต่ำเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเยื่อบริสุทธิ์ทั้งหมด (สมาคมการพิมพ์ไทย, 2551) ผลดีของการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสีย คือ ลดการตัดต้นยูคาลิปตัสทำให้ดูดซึมก๊าซ CO_2 ได้มากขึ้น แต่สำหรับการใส่ปุ๋ยเพื่อการเจริญเติบโตของต้นยูคาลิปตัสยังคงปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่เกิดจากการใช้ปุ๋ย และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น สภาวะโลกร้อน และสภาวะยูโทรฟิเคชั่น

ตารางที่ 3-15 มลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระดาษด้วยกระดาษเสีย (Waste Paper Recycling)

มลสาร	ปริมาณ	หน่วย
CO_2	1,625,454.55	g/ton paper
CH_4	1,412.73	g/ton paper
N_2O	14.80	g/ton paper
NO_x	3,778.36	g/ton paper
CO	836.36	g/ton paper
NMVOC	2,952.73	g/ton paper
Particulates	885.91	g/ton paper
COD	32.20	g/ton paper

ที่มา : Zabaniotou and Kassidi (2003)

3.7.6 ผลการประเมินกรณีศึกษาความอ่อนไหวผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Sensitivity Analysis)

การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) และการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสีย (M-Recycle) ที่นำมาใช้เพื่อศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการประเมินด้วยแบบจำลองในครั้งนี้ มลสารต่างๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่นำมาเสนอเกิดขึ้นจากกิจกรรมสำคัญที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม 9 กิจกรรม เป็นหลัก โดยมลสารอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียนไม่ได้นำมาเสนอ ดังตารางที่ 3-16 แต่การประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นผู้วิจัยประเมินผลจากมลสารทั้งหมดในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ผลการประเมินผลกระทบแต่ละประเภท รวมถึงผลกระทบโดยรวมที่เกิดขึ้น มีดังนี้

3.7.6.1 ผลกระทบสภาวะโลกร้อน

1. การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

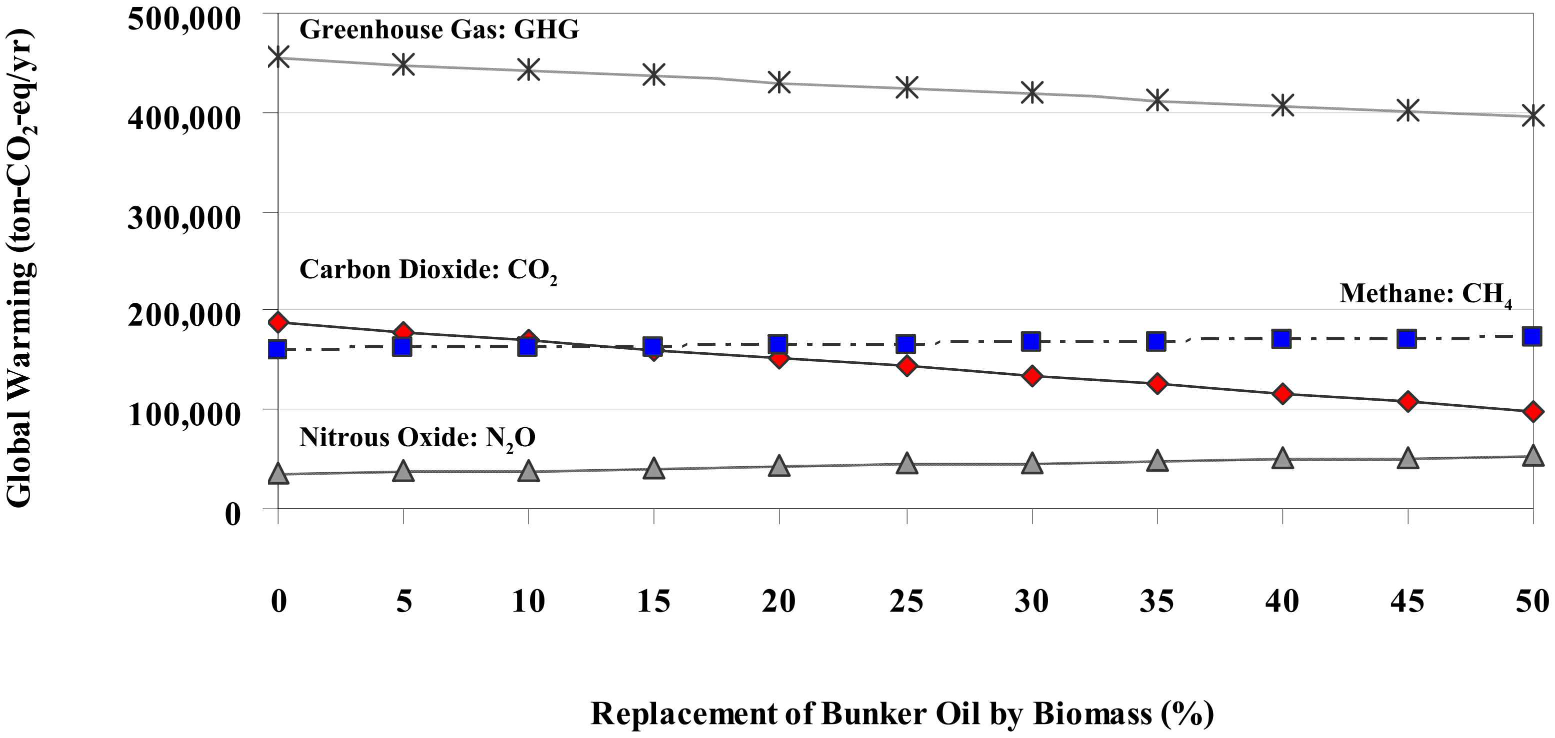
จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีปัจจุบัน (M-Current) ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) ออกสู่สิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนคิดเป็น 455,359 ton-CO_2/yr ซึ่งกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตาเป็นกิจกรรมที่ปลดปล่อยมลสาร CO_2 ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดเท่ากับ 177,732 ton-CO_2/yr สำหรับกรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อม ด้วยการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) ที่สัดส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อนเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ CO_2 มีค่าลดลงตามสัดส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาแทนที่ แต่ปริมาณ CH_4 และ N_2O มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน ทำให้ผลกระทบโดยรวม (Overall) ที่เกิดขึ้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลสูงกว่าน้ำมันเตาเพื่อให้ได้ค่าพลังงานความร้อนเท่ากัน (EPPO, 2009) จะเห็นว่าแม้ปริมาณ CO_2 จำนวนมากลดลงตามสัดส่วนของการนำมาแทนที่ เนื่องจาก CO_2 ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลสามารถกลับเข้าสู่วัฏจักรการเจริญเติบโตของต้นยูคาลิปตัส ซึ่งนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ รวมถึงเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ (IPCC, 2006) แต่ระดับความรุนแรงของ CH_4 และ N_2O เมื่อเทียบกับ CO_2 แล้วมีมากกว่า 23 เท่า และ 269 เท่า ค่ามลสาร CH_4 และ N_2O จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบที่ 3-17 แม้มลสาร CH_4 ที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมส่วนหนึ่งสามารถกลับเข้าสู่วัฏจักรการเจริญเติบโตของต้นยูคาลิปตัสได้ในรูปของ CO_2 ค่าตัวคูณศักยภาพการก่อผลกระทบ (Characterization Factor) ของ CH_4 จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื่อเพลิงชีวมวลจึงลดลงเหลือเท่ากับ 22 เท่า

2. การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่

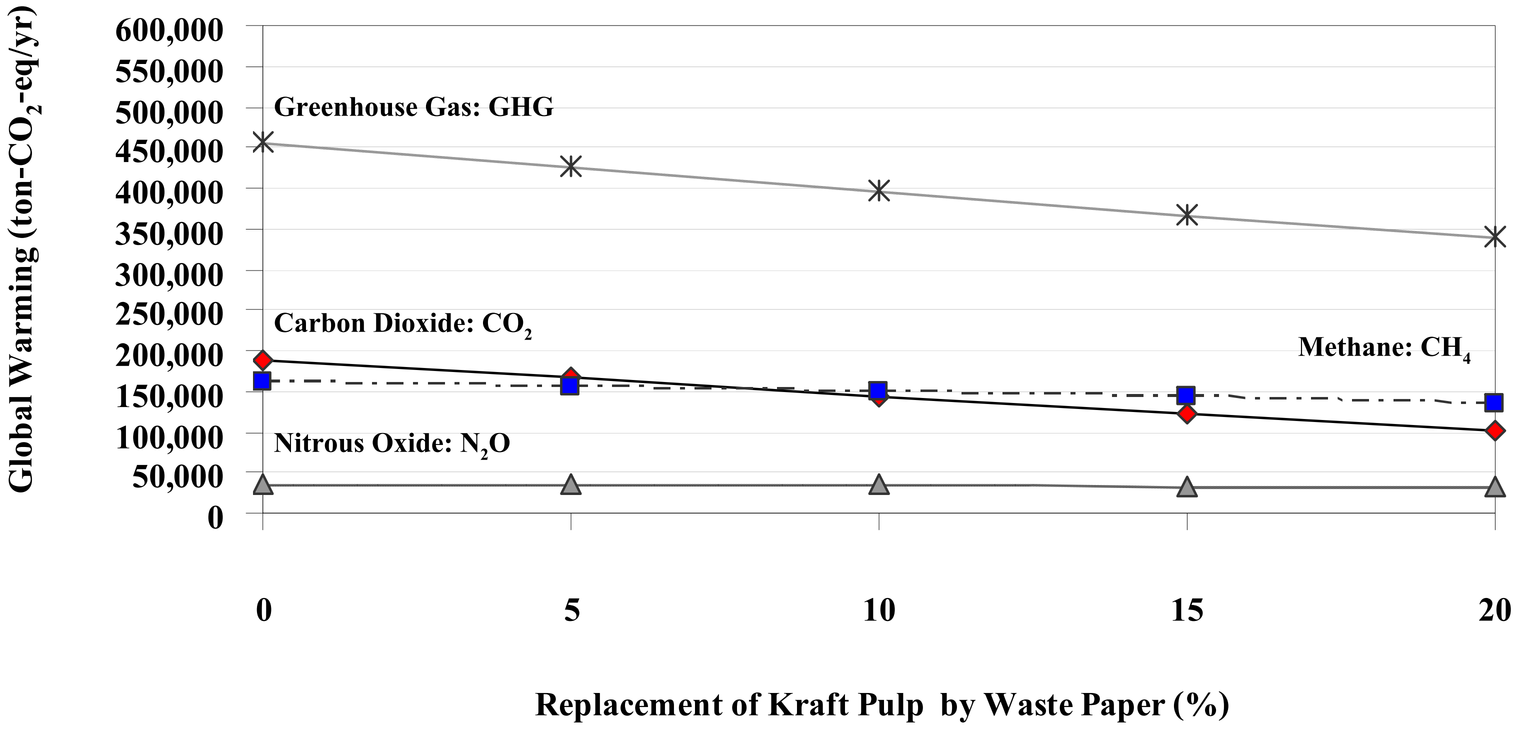
การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่ (M-Recycle) ที่สัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 20 พบว่า มลสาร CO_2 CH_4 และ N_2O มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน ดังภาพประกอบที่ 3-18 ซึ่งการนำกระดาษเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยทั่วไปมีผลต่อการลดลงมลสารต่างๆ โดยเฉพาะก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) (Goran and Tomas, 1998) เนื่องเป็นการจัดการกับของเสียก่อนการนำไปกำจัด เช่น การฝังกลบ ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระให้แก่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น นอกจากนี้การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียทำให้ลดการตัดต้นยูคาลิปตัสที่นำมาใช้ผลิตเป็นเยื่อบริสุทธิ์ได้ ปริมาณ CO_2 จึงถูกดูดซับจากต้นไม้เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ลดลง แต่มลสาร N_2O ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการใส่ปุ๋ยเพื่อการเจริญเติบโตของต้นยูคาลิปตัสยังคงปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงมีผลต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนเพิ่มขึ้น วิธีการคำนวณปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซับจากต้นยูคาลิปตัส และมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการใส่ปุ๋ยแก่ต้นยูคาลิปตัส แสดงไว้ดังภาคผนวก จ และภาคผนวก ฉ

ตารางที่ 3-16 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (Impact Score) ที่เกิดขึ้นในกรณีปัจจุบัน และกรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมจาก 9 กิจกรรม

ประเภทผลกระทบ	มลสาร	กรณีศึกษา						
		M-Current	M-Fuel			M-Recycle		
		0%	10%	30%	50%	5%	10%	20%
Global Warming ($ton\text{-}CO_2/yr$)	CO_2	187,638	169,864	134,318	98,772	165,872	144,107	100,294
	CH_4	160,709	162,447	167,038	171,629	154,453	148,252	135,686
	N_2O	35,891	39,614	47,059	54,504	35,076	34,347	32,632
Acidification ($ton\text{-}SO_2/yr$)	SO_2	594	567	512	457	564	535	475
	NO_x	1,946	2,169	2,435	2,700	2,069	2,105	2,167
	TRS	3	3.13	3.13	3.13	2.97	2.82	2.50
Eutrophication ($ton\text{-}PO_4^{3-}/yr$)	COD	438	438	438	438	419	400	363
	P	2,275	2,275	2,275	2,275	2,208	2,140	2,005
	NO_x	356	397	446	494	379	386	397
Smog ($ton\text{-}C_2H_4/yr$)	CO	3,488	3,865	4,619	5,374	3,382	3,285	3,066
	NMVOC	813	885	1,030	1,174	835	858	900
	CH_4	42	43	44	45	40	39	35
	NO_x	77	86	96	106	82	83	85
Human Toxicity ($ton\text{-}C_6H_4Cl_2/yr$)	TRS	0.37	0.37	0.37	0.37	0.35	0.33	0.29
	NO_x	3,289	3,667	4,115	4,563	3,498	3,558	3,663
	SO_2	57	54	49	44	54	51	46
	Particulates	1,394	1,394	1,394	1,394	1,374	1,354	1,313



ภาพประกอบที่ 3-17 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาแทนที่น้ำมันเตาในสัดส่วนต่างๆ



ภาพประกอบที่ 3-18 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่ที่สัดส่วนต่างๆ

3.7.6.2 ผลกระทบสภาวะฝนกรด

1. การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีปัจจุบัน (M-Current) ปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเท่ากับ 3,343 ton-SO_2/yr โดยมีมลสาร NO_x จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการคราฟท์ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุด และส่งผลกระทบต่อสภาวะฝนกรดเท่ากับ 1,115 ton-NO_x/yr เช่นเดียวกับการศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน (M-Current) โดยที่สัดส่วนร้อยละ 10 ปลดปล่อยมลสาร NO_x ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเท่ากับ 2,306 ton-NO_x/yr ที่สัดส่วนร้อยละ 30 ปลดปล่อยมลสาร NO_x ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเท่ากับ 2,725 ton-NO_x/yr และที่สัดส่วนร้อยละ 50 ปลดปล่อยมลสาร NO_x ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดเท่ากับ 3,145 ton-NO_x/yr ตามลำดับ แต่มลสาร SO_2 ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเผาไหม้น้ำมันเตามีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องจากกิจกรรมการเผาไหม้ชีวมวลไม่ก่อให้เกิดการปลดปล่อย SO_2 ออกสู่สิ่งแวดล้อม

2. การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่

สำหรับกรณีการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่ (M-Recycle) ที่สัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 20 ก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสาร NO_x จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2,069 ton-NO_x/yr 2,105 ton-NO_x/yr และ 2,167 ton-NO_x/yr ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการนำกลับกระดาษเสียก่อให้เกิด NO_x ออกสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของกระดาษเสียที่นำมาใช้ (Zabaniotou and Kassidi, 2003) แต่มลสาร SO_2 และ TRS ลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน แม้กรณี M-Recycle สามารถลดมลสาร SO_2 และ TRS ซึ่งเป็นสาเหตุในการก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรดได้ ดังตารางที่ 3-16 แต่กิจกรรมการปรับปรุงกระดาษเสียก่อนนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตกระดาษพิมพ์เขียนก่อให้เกิดมลสาร NO_x เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของกระดาษเสียที่นำมาใช้ รวมถึงเกิดมลสารชนิดอื่นๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อมด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3-15 ดังนั้นแม้วิธีการจัดการกระดาษเสียเป็นวิธีที่ดีในแง่ของการนำกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อลดการเกิดมลสารที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมด้วยวิธีการกำจัด แต่หากให้ความสำคัญกับการจัดการกระดาษเพื่อลดการเกิดกระดาษเสีย ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นก็ลงลดได้มากกว่า เพราะลดมลสารที่เกิดจากวิธีการนำกลับกระดาษเสียได้โดยตรง (Hospido *et al.,* 2003)

3.7.6.3 ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น

1. การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยแบบจำลอง พบว่า สภาวะยูโทรฟิเคชั่นของกรณีปัจจุบัน (M-Current) มีค่าเท่ากับ 3,528 ton-PO_4^{3-}/yr โดยมีมลสาร P (ฟอสฟอรัส) จากกิจกรรมการเติมธาตุอาหารของโรงงานผลิตกระดาษปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุด คิดเป็น 252 ton-P/yr ส่วนการศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมกรณีแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) ที่สัดส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 แม้ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัส (P) และ COD ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย แต่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมลสาร NO_x จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นมลสารตัวหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่น จึงทำให้ค่าผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน ดังนี้ 3,569 ton-PO_4^{3-}/yr 3,617 ton-PO_4^{3-}/yr และ 3,666 ton-PO_4^{3-}/yr ตามลำดับ

2. การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่

กรณีการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสีย (M-Recycle) พบว่า ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นมีค่าลดลงตามสัดส่วนของกระดาษเสียที่นำมาทดแทน เมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน (M-Current) เนื่องจากฟอสฟอรัส และ COD ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบดังกล่าวมีค่าการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลง แต่มลสาร NO_x จากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพกระดาษเสียก่อนนำมาผลิตกระดาษพิมพ์เขียนมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้มลสาร NO_x จากวิธีการนำกลับกระดาษเสียถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้น แต่สาเหตุสำคัญของการเกิดผลกระทบมาจากฟอสฟอรัสและ COD เป็นหลัก ผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลงตามลำดับ ดังตารางที่ 3-16 โดยที่สัดส่วนร้อยละ 5 ของกระดาษเสียที่นำมาแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นเท่ากับ 3,466 ton-PO_4^{3-}/yr ที่สัดส่วนร้อยละ 10 ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นเท่ากับ 3,389 ton-PO_4^{3-}/yr และที่สัดส่วนร้อยละ 20 ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะยูโทรฟิเคชั่นเท่ากับ 3,233 ton-PO_4^{3-}/yr เมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน

3.7.6.4 ผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ

1. การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีปัจจุบัน (M-Current) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษเท่ากับ 4,544 ton-C_2H_4/yr ซึ่งมีสาเหตุมาจากมลสาร CO จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปต์ด้วยกระบวนการคราฟท์เป็นหลัก ที่ปลดปล่อย CO ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดคิดเป็น 74,304 ton-CO/yr เช่นเดียวกับกรณีศึกษาการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของชีวมวลที่นำมาแทนที่ ดังตารางที่ 3-16 ที่ปลดปล่อยมลสาร CO จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาแทนที่ ดังนี้ ที่สัดส่วนร้อยละ 10 ปลดปล่อยมลสาร CO เท่ากับ 153,742 ton-CO/yr ที่สัดส่วนร้อยละ 30 ปลดปล่อยมลสาร CO เท่ากับ 181,696 ton-CO/yr และที่สัดส่วนร้อยละ 50 ปลดปล่อยมลสาร CO เท่ากับ 209,649 ton-CO/yr แม้การเผาไหม้น้ำมันเตาก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสาร CO ออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่เมื่อเทียบที่ค่าความร้อนเท่ากันแล้ว การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลปลดปล่อยมลสาร CO ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่าการเผาไหม้น้ำมันเตา 100 เท่า (IPCC, 1997) ผลที่ได้จึงทำให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษเพิ่มสูงขึ้นจากสัดส่วนของเชื่อเพลิงชีวมวลที่นำมาแทนที่น้ำมันเตา

2. การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่

สำหรับกรณีการนำกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่มาแทนที่เยื่อยูคาลิปตัส (M-Recycle) ในสัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 20 ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษน้อยลงตามสัดส่วนของมลสาร CO ที่ลดลงจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน ดังนี้ ที่สัดส่วนร้อยละ 5 ของการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่ปลดปล่อยมลสาร CO เท่ากับ 70,589 ton-CO/yr ที่สัดส่วนร้อยละ 10 ปลดปล่อยมลสาร CO เท่ากับ 67,190 ton-CO/yr และที่สัดส่วนร้อยละ 20 ปลดปล่อยมลสาร CO เท่ากับ 59,443 ton-CO/yr ไม่เพียงแต่มลสาร CO เท่านั้นที่ลดลงจากกรณีการนำกระดาษเสียมาแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสมลสารอื่นๆ เช่น CH_4 ก็ลดลงเช่นกัน เพราะการนำกระดาษเสียกลับมาใช้ใหม่มีผลต่อการใช้พลังงานจากในกระบวนการผลิตน้อยลง (Hanna *et al.,* 2008) จึงส่งผลให้ลดการใช้เชื้อเพลิงได้ และแม้ว่ากิจกรรมการปรับปรุงกระดาษเสียก่อนนำมาผลิตกระดาษพิมพ์เขียนจะมีการปลดปล่อยมลสาร CO NMVOC CH_4 และ NO_x เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนกระดาษเสียที่นำมาใช้ ทำให้ค่าการปลดปล่อยมลสาร NMVOC

และ NO_x เพิ่มสูงขึ้น ดังตารางที่ 3-16 แต่ มลสารหลักที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ คือ มลสาร CO จากกิจกรรการเผาไหม้เชื่อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลงตามสัดส่วนของกระดาษเสียที่นำมาแทนที่

3.7.6.5 ผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์

1. การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีปัจจุบัน (M-Current) ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษเท่ากับ 5,395 ton-DCB/yr สาเหตุมาจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ที่ปลดปล่อยมลสาร NO_x ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดคิดเป็น 1,115 ton-NO_x/yr เช่นเดียวกับกรณีการศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) ทำให้มลสาร NO_x จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจากการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้นตามสัดส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาแทนที่น้ำมันเตา ดังตารางที่ 3-16 แม้การปลดปล่อยมลสาร SO_2 ลดลง จากการนำเชื่อเพลิงชีวมวลมาแทนที่น้ำมันเตา เนื่องจาก การเผาไหม้เชื่อเพลิงชีวมวลไม่ก่อให้เกิดมลสาร SO_2 (IPCC, 1997) แต่ผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน เนื่องจาก สาเหตุหลักผลกระทบที่เกิดขึ้นมาจากการปลดปล่อยมลสาร NO_x จากการเผาไหม้เชื่อเพลิงชีวมวลเป็นสำคัญ ดังนี้ ที่สัดส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 ของการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลก่อให้เกิดผลกระทบเท่ากับ 5,770 ton-DCB/yr 6,212 ton-DCB/yr และ 6,655 ton-DCB/yr ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน

2. การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่

สำหรับกรณีการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสีย (M-Recycle) ส่งผลต่อการเกิดกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์สูงขึ้น แม้มลสารที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น TRS SO_2 และ ฝุ่นละออง (Particulates) ลดลง แต่กิจกรรมการปรับปรุงกระดาษเสียก่อนนำมาผลิตกระดาษพิมพ์เขียนปลดปล่อยมลสาร NO_x และ ฝุ่นละอองออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของกระดาษเสียที่นำมาแทนที่ ดังตารางที่ 3-15 โดยเฉพาะมลสาร NO_x ซึ่งเป็นมลสารตัวสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ดังตารางที่ 3-16 ผลที่ได้จึงทำให้ผลกระทบดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของกระดาษเสียที่นำมาแทนที่ โดยที่สัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 20 ของกระดาษเสียที่นำมา

แทนที่เยื่อยูคาลิปตัส ก่อให้เกิดผลกระทบเท่ากับ 5,580 ton-DCB/yr 5,618 ton-DCB/yr และ5,676 ton-DCB/yr ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีปัจจุบัน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zabaniotou and Kassidi, 2003 พบว่า การนำกระดาษเสียกลับมาใช้ใหม่ส่งผลต่อการเกิดสารพิษ และโลหะหนักซึ่งส่งผลต่อการเกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เพิ่มขึ้น

3.7.6.6 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall)

1. การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

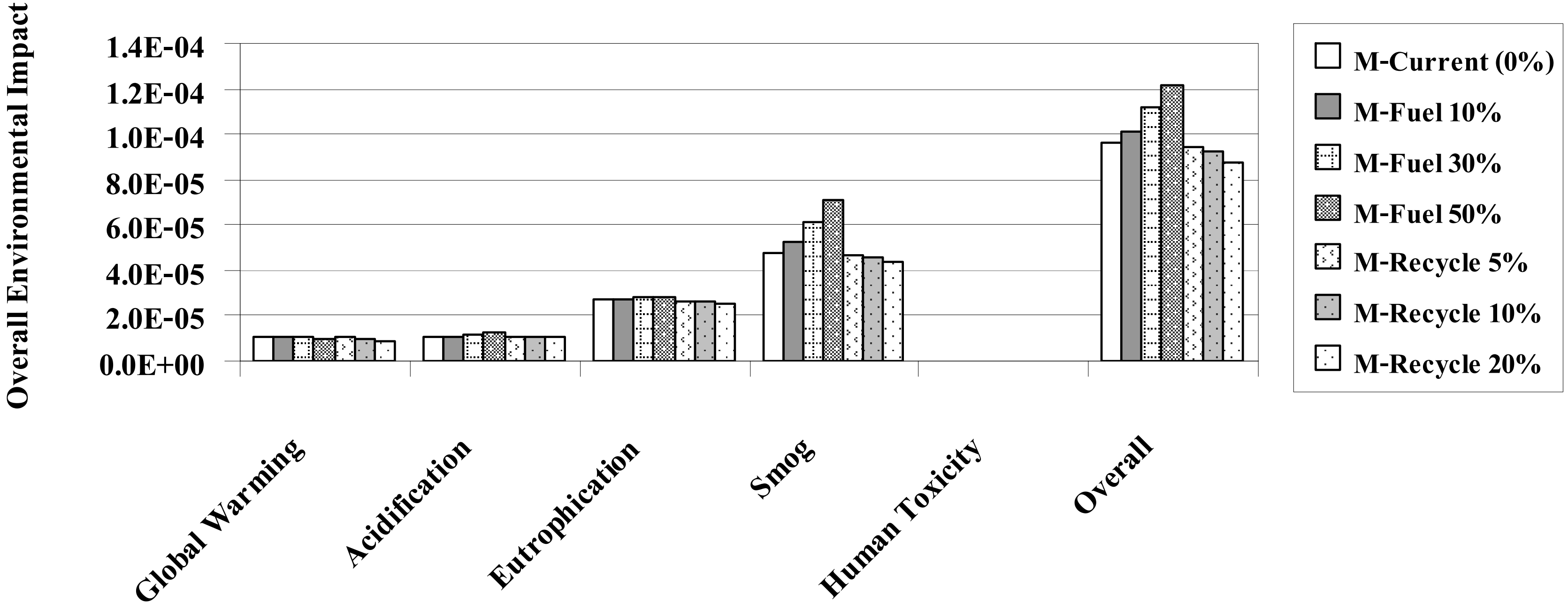
จากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Overall) โดยใช้แบบจำลอง พบว่า กรณีปัจจุบัน (M-Current) หรือ (0%) ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) เท่ากับ 9.61E-05 ส่วนการศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) ที่สัดส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 พบว่า การแทนที่น้ำมันเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล (M-Fuel) ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) เพิ่มขึ้น ดังนี้ ที่สัดส่วนร้อยละ 10 ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) เท่ากับ 1.01E-04 ที่สัดส่วนร้อยละ 30 ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) เท่ากับ 1.11E-04 และที่สัดส่วนร้อยละ 50 ก่อให้เกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) เท่ากับ 1.21E-04 ดังภาพประกอบที่ 3-19 โดยมีสาเหตุมาจากการปลดปล่อยมลสาร NO_x จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ แม้ว่ากฎหมายไทยมีการควบคุมการปลดปล่อยมลสาร NO_x แต่ค่าการปลดปล่อยของโรงงานก็อาจแตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่กฎหมายกำหนด (DIW, 1999) ทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้นสำหรับการปลดปล่อยมลสาร NO_x ของอุตสาหกรรมในประเทศไทย

2. การแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่

สำหรับกรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียนำกลับมาใช้ใหม่ (M-Recycle) ผลกระทบโดยรวม (Overall) มีค่าลดลงตามลำดับ ดังนี้ ที่สัดส่วนร้อยละ 5 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) มีค่าเท่ากับ 9.44E-5 ที่สัดส่วนร้อยละ 10 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) มีค่าเท่ากับ 9.24E-05 และที่สัดส่วนร้อยละ 20 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) มีค่าเท่ากับ 8.79E-05 ดังภาพประกอบที่ 3-19 เนื่องจาก การนำกระดาษเสียกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตเป็นเยื่อแทนเยื่อจากยูคาลิปตัส นอกจากลดปริมาณกระดาษเสียที่จะต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถลดการตัดต้นไม้ (ยูคาลิปตัส) ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเยื่อด้วยกระบวนการคราฟท์ได้ เป็นผลให้ต้นไม้เหล่านี้สามารถดูดซับปริมาณมลสาร CO_2 ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนได้มากขึ้น และแม้ว่ามีการใส่ปุ๋ย ในขณะที่ยูคาลิปตัสไม่ได้ถูกตัดไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต

เยื่อซึ่งนำกระดาษเสียมาใช้แทน ทำให้เกิดการปลดปล่อยมลสาร N_2O NO_x และ PO_4^{3-} ออกสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น แต่ก็เป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้นสำหรับมลสารต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบโดยรวม (Overall) และแม้ว่าคุณภาพของกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตจากกระดาษเสียมีคุณภาพไม่เทียบเท่ากับกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตจากเยื่อยูคาลิปตัสโดยตรง แต่หากสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการนำไปใช้งานที่ไม่ต้องการกระดาษที่มีคุณภาพมากนักก็เป็นแนวทางที่น่าสนใจและไปสู่การผลิตที่ยั่งยืนของกระดาษพิมพ์เขียน รวมถึงลดการเกิดของเสีย และวิธีการจัดการกับของเสียซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ปลดปล่อยมลสารต่างๆ และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นได้

สำหรับแบบจำลองที่นำมาใช้เพื่อการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในครั้งนี้ นอกจากนำมาประเมินการปลดปล่อยมลสารจากกิจกรรมต่างที่เกี่ยวข้องตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์กระดาษพิมพ์เขียน ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆ ในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ประเมินประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสารชนิดต่างๆ จากกิจกรรมสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประเมินผลกระทบจากกรณีต่างๆ เช่น ผลกระทบจากการนำทางเลือกมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสาร ผลกระทบตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ และผลกระทบความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้แล้ว หากผู้ประเมินต้องการนำแบบจำลองไปใช้ประโยชน์เพื่อประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยมีเรื่องของค่าใช้จ่ายของทางเลือกที่นำมาศึกษาเข้ามาเกี่ยวข้อง หรือมีนโยบายสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ที่แตกต่างกันออกไปโดยเฉพาะผู้ประกอบการ หรือโรงงานต่างๆ สามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้เป็นเครื่องมือเพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นโดยมีปัจจัยต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องพร้อมกันหลายปัจจัยได้ในครั้งเดียว



ภาพประกอบที่ 3-19 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Overall) ที่เกิดขึ้นจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง (กรณีศึกษาความอ่อนไหวของผลกระทบสิ่งแวดล้อม)

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

การนำหลักการการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของ LCA มาใช้เป็นเครื่องมือร่วมกับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน (MCA) ของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน ภายใต้ขอบเขตที่ผู้วิจัยกำหนด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการพัฒนามาจาก Jawjit *et al.* (2006) เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์มาคำนวณผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในครั้งนี้ เป็นงานวิจัยที่ทำเพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Jawjit *et al.* (2006) โดยประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน กิจกรรมสำคัญที่มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 80 มี 9 กิจกรรมจากทั้งหมด 21 กิจกรรม เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ การเผาไหม้ชีวมวล การบำบัดน้ำเสีย การเผาไหม้น้ำมันเตา การเทกองกลางแจ้ง การฝังกลบ การต้มเยื่อ การฟอกเยื่อ การรีดน้ำออก และการเผาไหม้ของเหลวดำ และทางเลือกที่สามารถลดผลกระทบโดยรวม (Overall) ได้มากที่สุด คือ การใช้พลังงานทดแทนซึ่งไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษพิมพ์เขียน เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม เป็นต้น ขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานที่นำมาใช้ของประเทศนั้นๆ และที่ตั้งของโรงงานจากแหล่งพลังงานทดแทน เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่นำมาใช้อยู่ในรูปของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยการผลิตยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ เป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสาร และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งควรนำมาศึกษา และหาทางแก้ไขเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น

การให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting) กับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับนโยบายของโรงงานเป็นหลัก ซึ่งแม้ทางเลือก หรือเทคนิคต่างๆ ที่โรงงานใช้ในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนในประเทศไทยมีความคล้ายคลึงกัน แต่ส่งผลต่อการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมทั้งหมด (Overall) ที่เกิดขึ้นทำให้มีค่าแตกต่างกัน วิธีการจัดการของเสีย เช่น การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งได้จากการปอกเปลือกไม้ยูคาลิปตัส และการนำกระดาษเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ สามารถลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้โดยเฉพาะก๊าซเรือนกระจกซึ่งส่งผลต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนได้

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับโรงงาน

- การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากทางเลือกที่โรงงานมีอยู่ คือ ระบบ Gasification เป็นอีกทางเลือกที่โรงงานสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งลดการเกิดมลสารต่างๆ โดยเฉพาะ NO_x และ SO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และการเผาไหม้น้ำมันเตาได้
- การนำกระดาษเสียกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น นำมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถจัดการกับกระดาษเสียได้ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการเผากระดาษเสียสามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งธรรมชาติ เช่น น้ำมันดิบ และช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการซื้อเชื้อเพลิงภายนอกโรงงานอีกด้วย
- โรงงานสามารถนำแบบจำลองที่ใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในครั้งนี้ประเมินผลกระทบเพื่อเปรียบเทียบกับโรงงานผลิตกระดาษพิมพ์เขียนโรงอื่นๆ ได้ ซึ่งหากผลการประเมินที่ได้มีค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า โดยมีนโยบายสิ่งแวดล้อมเหมือนกัน และแตกต่างกัน แสดงให้เห็นได้ว่าโรงงานมีประสิทธิภาพในการผลิตผลิตภัณฑ์กระดาษพิมพ์เขียนซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าโรงงานผลิตกระดาษพิมพ์เขียนโรงอื่น

4.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยเพิ่มเติม

- อุตสาหกรรมยางพารา เป็นอุตสาหกรรมสำคัญของภาคใต้ ที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางหลายประเภท เช่น น้ำยางข้น ยางสกิมบล็อก ยางแผ่น เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อการเกิดกลิ่นมลพิษ รวมถึงน้ำเสียจำนวนมากออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น NH_3 SO_2 COD และ BOD ดังนั้น การนำ LCA มาใช้เพื่อการประเมินผลกระทบจากอุตสาหกรรมยางจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เพื่อหาวิธีการปรับปรุง หรือแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น และได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้กระบวนการผลิตที่ยั่งยืนต่อไป
- แหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญของภาคใต้ที่สวยงาม รวมถึงนักท่องเที่ยวให้ความสนใจมาก คือ การท่องเที่ยวทางทะเล โดยสามารถนำเงินเข้าประเทศได้ปีละหลายล้านบาท แต่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมากตามมาเช่นกัน การนำ LCA มาใช้เพื่อประเมินผลกระทบจากการบริการต่างๆ แก่นักท่องเที่ยว สำหรับกลุ่มผู้ประกอบการ ทำให้รูปแบบการท่องเที่ยวทางทะเลกลายเป็นการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ และรักษาสิ่งแวดล้อมได้ต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2543. เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ. (สำเนา)

กรมโรงงาน. 2551. การผลิตเยื่อกระดาษ. http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/thai/chap3.pdf. (สืบค้นเมื่อ 1 เมษายน 2551).

ก่อพงศ์ หงส์ศรี และสมชาย ศิริเลิศพิทักษ์. สารประกอบ AOX ที่เกิดจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. ม.ป.ป. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_8_2551_Aox.pdf. (สืบค้นเมื่อ 26 ตุลาคม 2552).

คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิต และการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ. 2549. เอกสารการประชุม เรื่อง การประเมินวัฏจักรชีวิตและการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ. โครงการขับเคลื่อนเพื่อผลิตภัณฑ์ที่สะอาดและสร้างความพร้อมสำหรับ SMEs ของอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งออกไปยัง EU โดยใช้ Green Camp. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.

จันจิมา หะยียามา. 2547. การประเมินวัฏจักรชีวิตสายไฟชนิดพีวีซี และสายไฟที่ใช้วัสดุทดแทนพีวีซี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุฬาภรณ์ คนใหม่ และนฤมล วงศ์ธนาสุนธร. 2552. การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตโครงเครื่องรับโทรทัศน์โดยการประเมินวัฏจักรชีวิต. เอกสารการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 8, 25-27 มีนาคม 2552.

ชิมมี่ วางโม และวันเพ็ญ วิโรจนกูฏ. 2551. การคัดเลือกพื้นที่ฝังกลบขยะมูลฝอยในประเทศภูฏานโดยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์. เอกสารการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7, 12-14 มีนาคม 2551.

ชมรมเพื่อนพิมพ์. 2551. ภาวะอุตสาหกรรมกระดาษ. http://www.printingpeople.org/index.php?lay_boardshow&category=printingpeopleorg&hispage=7&No=25343. (สืบค้นเมื่อ 8 มีนาคม 2551).

ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และเศรษฐ์ สัมภัตตะกุล. 2544. การประเมินวัฏจักรชีวิตของตู้เย็นพาณิชย์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ 9: 22-40.

นงค์นุช พฤฒิชัยวิบูลย์. 2547. การประเมินวัฏจักรชีวิตของโรตารีคอมเพรสเซอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นพภาพร พานิช, แสงสันต์ พานิช, วิจิตรา จงวิศาล, วราวุธ เสือดี และวงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์. 2547. *ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นรรัตน์ รอดประเสริฐ. 2548. การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยหลักการการประเมินวัฏจักรชีวิต. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ประเสริฐ ภวสันต์ วิทย์ สุนทรนันท์ พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ พรทิพย์ วงษ์สุโชโต และคณาวุฒิ บุญญานพคุณ. 2547. รายงานฉบับสมบูรณ์ *"โครงการการประเมินวัฏจักรชีวิตกระดาษ ระยะที่ 1 การจัดทำฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระดาษ"*. สำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย (สกว.)

ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์ และภานุพงศ์ สถิตวัฒนาพร. 2547. ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษและกระดาษ บริษัท แอ๊ดวานซ์ อะโกร จำกัด (มหาชน). *วารสารสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย*. 1(5):33-34.

พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์. 2544. การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เรื่องสมุดปกเขียวว่าด้วยนโยบายครบวงจรของสินค้ายุโรป. กรุงเทพฯ: กรมการค้าต่างประเทศ. อ้างถึงใน จันจิรา หะยียามา, การประเมินวัฏจักรชีวิตสายไฟชนิดพีวีซี และสายไฟที่ใช้วัสดุทดแทนพีวีซี. 2544. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฝ่ายวิจัยธนาคารกรุงศรีอยุธยา. 2551. อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษไทย. ธนาคารกรุงศรีอยุธยา จำกัด (มหาชน). http://www.krungsri.com/pdf/research/03_in...aper/Paper3.pdf. (สืบค้นเมื่อ 8 มีนาคม 2551).

ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล. ลิกนิน-แทนนิน. ม.ป.ป. กรมโรงงาน. http://www2.diw.go.th/research/%E0%CD%A1%CA%D2%C3%E0%BC%C2%E1%BE%C3%E8/%C5%D4%A1%B9%D4%B9.pdf. (สืบค้นเมื่อ 17 ธันวาคม 2552).

สารานุกรมเสรี (วิกิพีเดีย). 2551. กระดาษ. http://www.th.wikipedia.org/wikipedia.org/wiki/. (สืบค้นเมื่อ 12 เมษายน 2551).

สุชาติ ปรีชาธร. 2552. ความรู้พื้นฐานเรื่องโรงไฟฟ้า (ตอนที่ 1). ไทยแลนด์อินดัสตรี้ดอทคอม. http://thailandindustry.com/home/FeatureStory_preview.php?id=9536&section=9&rcount=Y. (สืบค้นเมื่อ 21 ธันวาคม 2552).

สุธา ขาวเขียว, ขวัญฤดี โชติชนาทวีวงศ์, วรณัฐ การิกาญจน์, ชุมพล ชีวะประภานันท์, ประไพรัตน์ ลาวัณย์วัฒนกุล, ปราณี พันธุมสินชัย, สุวิทย์ ชุมนุมศิริวัฒน์, กฤษณ์ เฑียรประสิทธิ์, รินทวัฒน์ สมบัติศิริ และภัทรพล ลิ้มภักดี. 2548. *ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน.

สุรศักดิ์ วิทย์ศลาพงษ์. 2548. การประเมินวัฏจักรชีวิตตู้เย็นที่ใช้ในบ้าน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพร กมลศิริพิชัยพร, วิทย์ สุนทรนันท์, แสงชัย วิริยะอำไพวงศ์, ประกอบ พิกุลกานตเลิศ, เอียด สุนทรอารมณ์, มณี ศิริไชยพงษ์เทพ, จิตรกร ธนภูมิชัย, วิสันต์ ปันยารชุน, อุดม ชะชัย, ธเนศ สมบูรณ์, พงษ์สูรย์ รุจาคม และอลงกรณ์ ปิติชัยชาญ. 2543. รายงานฉบับสมบูรณ์. *การประยุกต์ใช้ดัชนีชี้วัดทางด้านการผลิตตามแนวทางของ Global Reporting Initiative กับอุตสาหกรรมเยื่อ และกระดาษในประเทศไทย*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสมาคมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.

สรรเพชุดา เถื่อนทองคำ และภาณุ ด่านวานิชกุล. 2552. การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตน้ำยางข้น. เอกสารการประชุมวิชาการการจัดการของเสียและพลังงานทางเลือกในสภาวะโลกร้อน: โอกาสและความท้าทาย, 11-12 กุมภาพันธ์ 2553.

สำนักวิเคราะห์สินค้าและอุตสาหกรรม. 2550. อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษ. http://61.19.225.10/vtlupload_file//1179735295250/paper%2049.pdf. (สืบค้นเมื่อ 3 เมษายน 2551).

วิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงของแข็ง. 2007. ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Energy_Conservation_in_Industrial_Plant/5_1_14.html. (สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2551).

ศูนย์บริหารจัดการและส่งเสริมสิ่งแวดล้อม เครือสหวิริยา. มาตรฐานคุณภาพอากาศ. ม.ป.ป. http://www.svg-environcentre.com/services_air.html. (สืบค้นเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2552).

เพชรดา บัวสมบูรณ์, ปมทอง มาลากุล ณ อยุธยา และ กนกศักดิ์ เอี่ยมโอภาศ. 2551. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเทคโนโลยีการฝังกลบขยะมูลฝอยชุมชน โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต. เอกสารการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7, 12-14 มีนาคม 2551.

เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล. 2544. การประเมินวัฏจักรชีวิตตู้เย็นพาณิชย์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Ana C D, Luis A and Isabel C. 2007. Life Cycle Assessment of Printing an Writing Paper Produced in Portugal. *Life Cycle Assessment* 12: 521-528.

Advance Agro Public Co., Ltd. 2551. กระบวนการผลิตกระดาษ. http:/www.doubleapaper.com/knowing/paper_process1.pdf. (สืบค้นเมื่อ 2 เมษายน 2551).

Advance Agro Public Co., Ltd. 2551. องค์ประกอบของกระดาษ. http://www.doubleapaper.com/knowing/paper_element1.pdf. (สืบค้นเมื่อ 2 เมษายน 2551).

Ali M, Sreekrishnan T R. 2001. Aquatic Toxicity from Pulp and Paper Mill Effluents: a Review. *Advance Environmental Research* 5: 75-196.

Avsar E and Dimirer G N. 2008. Cleaner Production Opportunity Assessment Study in SEKA Balikesir Pulp and Paper Mill. *Cleaner Production* 16 (4): 422-431.

Bordado J C M and Gomes J F P. 2002. Emission and Odor Control in Kraft Pulp Mills. *Cleaner Production* 11 (7): 797-801.

CIFOR. 1999. Guidelines for Applying Multi-Criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators, The Criteria and Indicators Toolbox Series 9. International Forestry, Jakarta, Indonesia.

CML. 2002. Impact Assessment Spreadsheet Version 2.6. Center of Environmental Science, Lieden University, The Netherlands.

CML. 2004. Impact Assessment Spreadsheet Version 2.7. Center of Environmental Science. Lieden University, The Netherlands.

Cofala F and Syri S. 1998. Nitrogen Oxide Emissions, Abatement Technologies and Related Costs for Europe in the RAINS model database. IR-98-88. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Luxemburg, Austria.

CORINAIR. 2000. Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Second Edition: The Core Inventory of Air Emission in Europe, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

DIW. 1999. Technology Guideline for Environmental Management for Pulp and Paper in Thailand. Department of Industrial Work, Bureau of Environmental Technology, Ministry of Industry, Bangkok, Thailand.

EC. 2001. Integrated Pollution Control (IPPC); Reference Document on Jawjit W. 2006.

ERIC and TPPIA. 2002. Application of the Production Performance Indicators in Accordance with Global Reporting Initiative (GRI) to Thai Pulp and Paper Industries. Thai Pulp and Paper Industries Association, Bangkok, Thailand. (Thailand edition).

EPA. 1993. Handbook on Pollutant Prevention Opportunities for Bleached Kraft Pulp and Paper mills. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

EPPO. 2009. Energy Statistics. Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy Thailand. http://www.eppo.go.th/info/index.html. (accessed December 1, 2009).

Faustino (Tino) Prado, P E. 2003. The control of Total Reduced Sulfur (TRS) in Kraft Pulp Mills. Prado & Associates Organization. http://www.portofentry.con/site/root/resources/case_study/1961.html. (accessed October 21, 2009).

Faaij A, Van Ree R, Waldheim L, Olsson E, Oudhuis A, Van Wijk A, Daey-Ouwens C and Turkenburg W. 1997. Gasification of Biomass Wastes and Residues for Electricity Production. *Biomass and Bioenergy* 12(6): 387-407.

Fancy Paper Co., Ltd. 2002. Paper . http://www.fancypaper.co.th/website/thai/product_index.php. (accessed December 8, 2009).

Farahani S, Worrell E and Bryntse G. 2004. CO_2 Free Paper. *Conservation and Recycling* 42:317-336.

Francesco C, Silvia B and Sergio U. 2008. Life Cycle Assessment (LCA) of Waste Management Strategies: Landfilling, Sorting Plant and Incineration. *Energy* 1-8.

Goedkoop M. 2000. The Eco-Indicator 99, Final Report, Pre-Consultants, Amersfoort.

Gonzalez P, Zaror C. 2000. Effect of Process Modifications on AOX Emission from Kraft Pulp Bleaching, Using Chilean Pine and Eucalyptus. *Cleaner Production* 8: 233-241.

Goran F and Tomas E. 1998. Life-Cycle Assessment as a Decision-Support Tool-the case of Recycling Versus Incineration of Paper. *Conservation and Recycling* 24: 235-256.

Guinee I B, Gorree M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, Udo De Haes H A, Van Der Voet E and Wrisberg M N. 2000. Life Cycle Assessment. An Operation Guide to ISO Standards. Center of Environmental Scienoe, Leiden Universty (CML), The Netherlands.

Hanna M, Anders D and Thomas H. Christensen. 2008. Life Cycle Assessment of Waste Paper Management: The Importance of Technology Data and System Boundaries in Assessing Recycling and Incineration. *Conservation and Recycling* 52: 1391-1398.

Hauschild M and Wenzel H. 1998. Environmental Assessment of Products. Volume 2: Scientific Background. Chapman & Hall, London.

Heijungs R, Guine J B, Huppes G, Lankerijer R M, Udo de Haes H A, Wegener Sleeswijk A, Ansems A M M, Eggels P G, Van Duin R and De Goede H P. 1992. Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guidelines and backgrounds. Center of Environmental Science (CML) (NOH report 9266 and 9267), Leiden.

Heminway S. 1995. The Sector Notebook Project: Pulp and Paper Industry. US. Environmental Protection Agency (EPA). Washington DC, USA.

Henrik W, Michael H and Leo A. 1997. Environmental Assessment of Products, Vol. 1: Methodology. Tool and case studies in product development. London: Chapman&Hall.

Hermann B G, Kroeze C, Jawjit W. 2006. COMPLIMENT-Assessing Environmental Performance by Combining life Cycle Analysis, Multi-Criteria Analysis and Environmental Performance Indicators. *Cleaner Production* 15: 1787-1796.

Hospido A, Moreira M T and Feijoo G. 2003. Simplified Life Cycle Assessment of Galician Milk Production. *International Dairy* 13: 783-796.

Hynninen P O. 1998. Papermaking Science and Technology Environmental Control. The Finnish Paper Engineer's Association and TAPPI. Finland.

IGES. 2008. IGES Capacity Building Workshop for Clean Development Mechanism (CDM) in Bangkok, Thailand. Jointly Organized by TEI, IGES and TGO. (November 27-28, 2008).

IPCC. 1997. Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, IPCC Guidelines for Notional Greenhouse Gas Inventories Volume3. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Press, Cambridge.

IPCC. 2006. NGGIP Publications. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html. (accessed September 7, 2008).

Jannick H S, Peter H, Anne M and Per C. 2007. Life Cycle Assessment of the Waste Hierarchy – A Danish Case Study on Waste Paper . *Waste Management* 27:1519-1530.

Jawjit W. 2006. An Environmental Systems Analysis of the Kraft Pulp Industry in Thailand. PhD. Thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.

Jawjit W, Kroeze C, Soontaranun W and Hordijk L. 2006. An Analysis of the Environment Pressure Exerted by the Eucalyptus-Based Kraft Pulp Industry in Thailand. *Environment, Sustainability and Development* 8(2): 289-311.

Jawjit W, Kroeze C, Soontaranun W and Hordijk L. 2007. Option to Reduce the Environmental Impact by the Eucalyptus-Based Kraft Pulp Industry in Thailand: Model description. *Cleaner Production* 15: 1827-1839.

Joelsson J M, Gustavsson L. 2008. CO_2 Emission and Oil Reduction through Black Liquor Gasification and Energy Efficiency Pulp and Paper Industry. *Conservation and Recycling* 52: 747-763.

Kimura Y, Kato S, Maruyama N, Sadamichi Y, Widiyanto A and Joukaku Y. 2001. Ecological Improvement of the Vending Machine Using LCA Method: Second International Symposium on Environmentally Conscious Desing and Inverse Manufacturing, Tokyo, 11-15.

Larson E D, Consonni S and Katofsky R E. 2003. A Cost-Benefit Assessment of Biomass Gasification in Pulp and Paper Industry. Final report. Princeton University, Politecino di Milano, Navigant Consulting Inc.

Lindfors L-G, Christiansen K, Hoffman L, Virtanen Y, Juntilla V, Hanssen O-J, Ronning A, Ekvall T and Finnveden G. 1995. Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment. Nord 1995 : 20, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.

Lopes E, Dias A, Arroja L, Capela I and Pereira F. 2003. Application of Life Cycle Assessment to the Portuguese Pulp and Paper Industry. *Cleaner Production* 11: 51-59.

Lundie S and Peter M G. 2005. Life Cycle Assessment of Food Waste Management Options. *Cleaner Production* 13: 275-286.

Martinez E, Sanz F, Pellegrini S, Jimenez E and Blanco J. 2009. Life Cycle Assessment of a Multi-Megawatt Wind Turbine. *Renewable Energy* 34: 667-673.

Michiel R J D and Morton A B. 1995. Estimate of Global Methane Emission from Landfill and Open Dumps. EPA. http://www.p2pays.org/ref/07/06250.pdf. (accessed October 22, 2009).

Miner R and Upton B. 2002. Methods for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Lime Kilns at Kraft Pulp Mills. *Energy* 27(8): 729-738.

Mollersten K, Gao L, Yan J and Obersteiner M. 2004. Efficient Energy Systems with CO_2 Capture and Storage from Renewable Biomass in Pulp and Paper Mills. *Renewable Energy* 29(9): 1583-1598.

NAFRI. 2006. National Agriculture and Forestry Research Institute. Lao Tree Seed Project, Species Monograph NO. 24, Nam Souang Forest Research Centre. http://www.org.la/documents/NTFPNews/LTSP/24_Eucalyptus_camaldulensis.pdf. (accessed September 10, 2008).

Ongmongkoklkul A, Nielsen P H, and Nazhad M M. 2001. Life Cycle Assessment of Paperboard Packaging Produced in Thailand, Master thesis EV-01-2, Asian Institute of Technology. Thailand.

Oonk H and Kroeze C. 1998. Nitrous Oxide Emissions and Control. Wiley & Son Inc.

PCD. 1996. Database of Air and Noise Pollution Sources in Thailand year 1994: A Final Report, Pollution Control Department, Ministry of Science, Technology and Environment, Thailand.

Pickin J G, Yuen S T S and Hennings H. 2002. Waste Management Option to Reduce Greenhouse Gas Emission from Paper in Australia. *Atmospheric Environment* 36: 741-752.

Pluimers J C. 2001. An Environment System Analysis of Greenhouse Horticulture in The Netherlands: The Tomato Case. PhD. Thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.

Poyry J. 1992. Technical and Economical Evaluation of Water Pollution Control in Pulp Mill. Jaalkko Poyry Consulting, Helsinki, Finland.

Rivela B, Moreira M T, Bornhardt C, Mendez R and Feijoo G. 2004. Life Cycle Assessment as A Tool for the Environmental Improvement of the Tannery Industry in Developing Countries. *Environmental Science Technology* 38: 1901-1909.

Sakurai K. 1995. Cleaner Production for Green Peoductivity: Asian Prespective. Asian Productivity Organization Tokyo.

Sara G-G, Almudena H, Teresa M, Javier R and Gumersindo F. 2009. Environmental Impact Assessment of Total Chlorine Free Pulp from Eucalytus Globules in Spain. *Cleaner Production* 17: 1010-1016.

Sara G-G, M. Teresa M, Gerardo A, Lluis M and Gumersindo F. 2009. Environment Impact Assessment of Non-Wood Based Pulp Production by Soda-Anthraquinone Pulping Process. *Cleaner Production* 18: 137-145.

Sara G-G, Staffan B, Gumersindo F and Ma T M. 2009. Comparative Environmental Assessment of Wood Transport Models a Case Study of a Swedish pulp mill. *Science of the Total Environment* 407: 3530-3539.

Schnell A, Steel P, Melcer H, Hodson P V and Carey J H. 2000. Enhanced Biological Treatment of Bleached Kraft Mill Effluents. I. Removal of Chlorinated Organic Compound and Toxicity. Water Research 34(2): 493-500.

Schwaiger H, Zimmer B. 1995. A Comparison of Fuel Consumption and Greenhouse Gas Emission from Forest Operations in Europe. In Solberg B and Roihuvo L. Environmental impact of forestry and forest industry. Proceeding of the International Seminar organized by the Finnish-French Society of Science and Technology and the European Forest Institute, Joensuu, Finland.

Sharma R. 2004. Thailand Pulp and Paper Industry: Hoping to Ride on a Strong Economy. *Paper Asia* 20(6): 14-18.

SWLF. 2007. Municipal Solid Waste Management in Thailand. http://www.swlf.ait.ac.th/data/Case20studies/National20report-Thailand.pdf. (accessed June 8, 2009).

TAPPI. 1996. Design Consideration for Cost-Effective Kraft and Sulfite Pulping Liquor Spill Control System. TAPPI proceeding "Minimum effluent mill symposium".

TEI. 1999. Industrial Environment Performance Indicators. The Third Progress Report, Thailand Environment Institute, Submitted to Pollution Control Department, Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok, Thailand. (Thai edition).

Thai Paper Company. 2551. Paper Process. http://www.thaipaper.com/facilities.asp?smnu=fac&mnu=about. (accessed April 5, 2009).

Tiina L, Hannu N, Risto P, Jaakko R, Toivo K and Jaakko P. 2008. Effect of Biological Wastewater Treatment on the Molecular Weight Distribution of Soluble Organic Compounds and on the Reduction of BOD, COD and P in Pulp and Paper Mill Effluent. *Water Research* 42: 3952-3960.

Ulrika W, Thore B and Paul S. 2005. The Potential for Energy Saving When Reducing The Water Consumption in a Kraft Pulp Mill. *Applied Thermal Engineering* 25: 1057-1066.

UNEP. 1996. Environmental Management in the Pulp and Paper Industry. United Nation Environment Programmed: Industry and Environment. Stockholm, Sweden.

Westbound Engineering Co., Ltd. Mechanical Seals. ม.ป.ป. บริษัท เวสท์บาวด์เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด. http://www.thaiseal.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=271595&gclid=CICJ3IX4554CFQQwpAoduX7XzQ. (สืบค้นเมื่อ 21 ธันวาคม 2552).

World Bank. 1998. Pollution Prevention and Abatement: Pulp and Paper Mills. http://www.ifc.org/ifcex/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/gui_pulp_WB$FILE/pulp_PPAH.pdf. (accessed August 8, 2008).

Yoon S H, Chai X S, Zhu J Y, Li J and Malcolm E M. 2001. In-Digester Reduction of Organic Sulfur Compounds in Kraft Pulping. *Environmental Research* 5: 91-98.

Zabaniotou A, Kassidi E. 2003. Life Cycle Assessment Applied to Egg Packaging Made from Polystyrene and Recycled Paper. *Cleaner Production* 11: 549-559.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณข้อมูลขาเข้า และขาออก

1. วิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory Analysis) สารขาเข้า

1.1 การปลูกยูคาลิปตัส (Eucalyptus forestry)

1.1.1 Fertilizers (ปุ๋ย)

การเพาะเมล็ด และปลูกต้นยูคาลิปตัส สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ใช้พื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสในประเทศไทยทั้งหมด 48,640 ha (TERRA, 2007) และใช้ต้นยูคาลิปตัสในการปลูกทั้งหมด 80,864,000 ต้น/ปี (Advance Ago Company, 2550) ซึ่งคำนวณจาก 1 ไร่ ปลูกยูคาลิปตัส 266 ต้น (1 ha เท่ากับ 6.25 ไร่)

สำหรับการเพาะเมล็ดพื้นที่ 18,133 ha ใช้ปุ๋ย N และ P เท่ากับ 2.46 ตัน/ปี และ 1.15 ตัน/ปี (Jawjit *et al.*, 2006) ดังนั้นถ้าพื้นที่เพาะเมล็ด 48,460 ha จะต้องใช้ปุ๋ย N และ P เท่ากับ

ปุ๋ย N = (48,640×2.46)/18,133 = 6.60 ตัน/ปี

ปุ๋ย P = (48,640×1.15)/18,133 = 3.08 ตัน/ปี

สำหรับปุ๋ยเพื่อการปลูกใช้สูตร 18-18-14 (Advance Ago Company, 2550) ระยะเวลาการปลูกต้นยูคาลิปตัสใช้เวลา 4 ปี ก่อนที่จะทำการตัดต้นไปเพื่อผลิตเยื่อได้ และจะต้องใช้ปุ๋ยสำหรับการปลูกทั้งหมดเท่ากับ 72.5 กรัม/ต้น ซึ่งคิดเป็นจำนวนปุ๋ยทั้งหมดที่จะต้องใส่เท่ากับ 5,863 ตัน/ปี

คิดเป็นปุ๋ย N = (5,863×18)/100 = 1,055 ตัน/ปี

คิดเป็นปุ๋ย P = (5,863×18)/100 = 1,055 ตัน/ปี

1.1.2 น้ำมันดีเซล (Diesel)

การเก็บเกี่ยวต้นยูคาลิปตัส และการขนส่งไม้ยูคาลิปตัสใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องมือในการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกไม้เพื่อขนส่งเข้าสู่โรงงานผลิตเยื่อ โดยอ้างอิงข้อมูลจาก (Jawjit *et al.*, 2006)

1.2 การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ (Kraft Pulp Production)

1.2.1 Chorine dioxide (ClO_2)

ใช้สาร ClO_2 เพื่อการฟอกในกระบวนการผลิตเยื่อ และใช้ ClO_2 เพื่อการฟอก 1.2 ตัน/กำลังการผลิต 600 ตัน/วัน (DIW, 1999) ดังนั้น กำลังการผลิตเยื่อ 800,000 ตัน/ปี จะต้องใช้ ClO_2 ทั้งหมด 1,600 ตัน/ปี

1.2.2 Biomass (เปลือกไม้)

ในการผลิตเยื่อกระดาษ 1 ตัน ต้องใช้เชื้อเพลิง (เปลือกไม้) เพื่อผลิตพลังงานภายใต้กระบวนการผลิตเยื่อเท่ากับ 23.22 GJ (สมพร และคณะ, 2543) ดังนั้นกำลังการผลิตเยื่อ 1 ปี เท่ากับ 800,000 ตัน จะต้องใช้ไม้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงทั้งหมด เท่ากับ 18,576 TJ/ปี

1.2.3 Lime (ปูนขาว)

ปูนขาวถูกนำมาใช้ เพื่อหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์จากยูคาลิปตัส ซึ่งใช้ปูนขาว 120,000 ตัน/กำลังการผลิต 800,000 ตัน/ปี (DIW, 1999) โดยการผลิตเยื่อ 1 ตัน ใช้ปูนขาว 0.15 ตัน

1.2.4 Bunker Oil (น้ำมันเตา)

น้ำมันเตาที่นำมาใช้ ใช้สำหรับหน่วยการนำกลับคืนสารเคมีของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษคราฟท์จากยูคาลิปตัส ซึ่งใช้น้ำมันเตา 0.139 ลูกบาศก์เมตร/กำลังการผลิตเยื่อ 1 ตัน กำลังการผลิตเยื่อ 800,000 ตัน จะต้องใช้น้ำมันเตา 111,200 ลูกบาศก์เมตร (DIW, 1999) โดยน้ำมันเตา 1 ลูกบาศก์เมตร ให้ค่าความร้อน 0.0413 TJ (วิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงของแข็ง, 2550) ดังนั้น น้ำมันเตาที่ใช้ในการผลิตเยื่อทั้งหมด ให้ค่าความร้อนเท่ากับ 4,592.56 TJ

1.2.5 Wastewater (น้ำเสีย)

ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ด้วยกระบวนการคราฟท์ 1 ตัน เท่ากับ 23.31 ลูกบาศก์เมตร (สมพร และคณะ, 2543) การศึกษาในครั้งนี้พิจารณากำลังการผลิตภายใน 1 ปี มีค่าเท่ากับ 800,000 ตัน ดังนั้นปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 18,648,000 ลูกบาศก์เมตร/ปี

1.3 การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน (Printing and Writing Paper Production)

1.3.1 Biomass (เปลือกไม้)

เปลือกไม้ที่ถูกนำมาใช้เพื่อการผลิตไอน้ำ สำหรับใช้ในการอบกระดาษในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยกำลังการผลิต 1 ตัน จะใช้เปลือกไม้ 12.61 GJ (สมพร และคณะ, 2543) และเมื่อพิจารณากำลังการผลิต 1 ปี จะต้องใช้ไม้ทั้งหมด 12,610 TJ/ปี

1.3.2 Wastewater (น้ำเสีย)

ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตกระดาษ 1 ตัน มีปริมาณเท่ากับ 13 ลูกบาศก์เมตร (สมพร และคณะ, 2543) และงานวิจัยชิ้นนี้พิจารณากำลังการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน 1,000,000 ตัน/ปี ดังนั้นปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณเท่ากับ 13,000,000 ลูกบาศก์เมตร/ปี

1.4 การกำจัดกระดาษขั้นสุดท้าย (Paper Disposal)

1.4.1 Landfill (ฝังกลบ)

ปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมดในประเทศไทยปี 2551 มีปริมาณเท่ากับ 15,040,000 ตัน (PCD, 2551) ซึ่งใช้อ้างอิงเพื่อคิดคำนวณการกำจัดขยะกระดาษโดยวิธีการฝังกลบ การเผา และเทกองกลางแจ้ง คิดเป็นขยะกระดาษร้อยละ 16 หรือเท่ากับ 2,410,000 ตัน (SWLF, 2007) ขยะกระดาษเหล่านี้ถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบคิดเป็นร้อยละ 20 ของขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมดในประเทศไทย (SWLF, 2007) ดังนั้นปริมาณขยะกระดาษที่ถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ แสดงดังสมการด้านล่าง

$$\text{ขยะกระดาษฝังกลบ} = \{[(16\times 20)/100]\times 2.41E6\}/100$$

$$= 77{,}000 \text{ ตัน/ปี}$$

1.4.2 Incineration (เผา)

ขยะกระดาษที่ถูกนำไปเผาคิดเป็นร้อยละ 1 ของปริมาณขยะทั้งหมดที่เกิดขึ้นในประเทศไทย (SWLF, 2007) ดังนั้นขยะกระดาษที่เกิดขึ้น และถูกกำจัดโดยการนำไปเผา มีปริมาณดังนี้

ขยะกระดาษเผา = $\{[(16\times 1)/100]\times 2.41E6\}/100$

= 4,000 ตัน/ปี

1.4.3 Open dump (เทกองกลางแจ้ง)

ขยะกระดาษที่ถูกกำจัดโดยวิธีการเทกองกลางแจ้ง มีปริมาณมากถึงร้อยละ 72 ของปริมาณขยะทั้งหมดที่เกิดขึ้นในประเทศไทย (SWLF, 2007) ซึ่งคิดได้จากสมการดังนี้

ขยะกระดาษเทกองกลางแจ้ง = $\{[(16\times 72)/100]\times 2.41E6\}/100$

= 278,000 ตัน/ปี

ปริมาณขยะกระดาษที่เกิดขึ้นจากการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน 1,000,000 ตัน/ปี ถูกแบ่งออกเพื่อนำไปกำจัดด้วยวิธีการ 3 วิธีการ จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น ปริมาณขยะกระดาษที่เกิดขึ้นจากการผลิตใน 1 ปี ถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้ ฝังกลบ 214,484.68 ตัน/ปี เผา 11,142.06 ตัน/ปี และเทกองกลางแจ้ง 774,373.26 ตัน/ปี

1.5 ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor)

1.5.1 emission factor ของการเผากระดาษ 1 ตัน

กำหนดให้ค่า Total carbon content ของกระดาษมีค่าเท่ากับ 44% (IPCC, 2006)

และ มวลโมเลกุลของ O เท่ากับ 16

มวลโมเลกุลของ C เท่ากับ 12

ดังนั้น การเผากระดาษ 100 กิโลกรัม ส่งผลให้เกิดก๊าซ CO_2

เท่ากับ $(44\times 44)/12$ = 161.33 กิโลกรัม

หากเผากระดาษ 1 ตัน จะก่อให้เกิดก๊าซ CO_2

เท่ากับ $(440\times 44)/12$ = 1,613.33 กิโลกรัม

1.5.2 emission factor เทกองกลางแจ้งกระดาษ 1 ตัน (IGES, 2008)

$$BE_{CH_4\,SWDS} = \phi \times (1-f) \times GWP_{CH_4} \times (1-ox) \times \frac{16}{12} \times F \times DOC_f \times MCF$$
$$\times \sum_{x=i}^{y} \sum_{j} W_{j,x} \times DOC_j \times e^{-k_j \times (y-x)} \times (1-e^{-k_j})$$

โดยสมการที่ใช้ในการประเมินมีรายละเอียด ดังนี้

$BE_{CH_4\,SWDS}$ คือ ปริมาณการแพร่ระบายก๊าซมีเทนจากพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยในปี X

ϕ คือ ค่าการแก้ไข Model จากความไม่แน่นอน (0.9)

f คือ ปริมาณก๊าซมีเทนที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ และถูกทำลายโดยการเผาไหม้ หรือวิธีอื่น (0)

GWP_{CH_4} คือ ศักยภาพที่ทำให้โลกร้อนของก๊าซมีเทน ($tonCO_2/tonCH_4$)

ox คือ สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (0)

F คือ สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (0.5)

DOC_f คือ สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ (0.5)

MCF คือ ค่าปรับแก้สัดส่วนของมูลฝอยที่ก่อให้เกิดก๊าซมีเทน (0.4)

$W_{j,x}$ คือ ปริมาณมูลฝอยอินทรีย์ประเภท j ในพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยในปี x (ton)

DOC_j คือ สัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (0.4)

k_j คือ อัตราการย่อยสลายสำหรับของเสียประเภท j (กระดาษ) (0.07)

j คือ ลำดับชนิดของเสีย

y คือ ปีที่ใช้ในการคำนวณการแพร่ระบายก๊าซมีเทน (1)

x คือ ปีแรกที่รองรับมูลฝอย (x=1) จนถึงปีที่ใช้คำนวณการแพร่ระบายก๊าซมีเทน (x=y) (1)

ภาคผนวก ข

ประสิทธิภาพของทางเลือก

(Efficiency Single Option)

1. ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้

ประสิทธิภาพของทางเลือกแต่ละทางเลือกที่นำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ จากกิจกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดของมลสาร สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$Eff\ (\%) = \frac{[\sum M_{\mu}(refference) - \sum M_{\mu}(option)] \times 100}{\sum M_{\mu}(refference)}$$

โดยสมการที่ใช้มีรายละเอียด ดังนี้

Eff คือ ประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้

M_{μ} คือ ปริมาณมลสารที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละประเภท

μ คือ ผลกระทบแต่ละประเภท

$\sum M_{\mu}(refference)$ คือ ปริมาณมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละประเภทในกรณีอ้างอิง (ก่อนนำทางเลือกมาใช้)

$\sum M_{\mu}(option)$ คือ ปริมาณมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละประเภทของแต่ละทางเลือก (Option) ที่นำมาใช้

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพของทางเลือกที่นำมาใช้ในครั้งนี้ คือ การนำระบบ BIGCC มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากการเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็งให้กลายเป็นก๊าซ มีผลต่อการเกิดมลสารต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังตารางภาคผนวก ค-1 โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละประเภทคิดค่าผลกระทบจากมลสารที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรม 9 กิจกรรมสำคัญที่มีส่วนก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุดในวัฏจักรชีวิตกระดาษพิมพ์เขียน

ตารางภาคผนวก ข-1 ปริมาณมลสารแต่ละประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการนำทางเลือกระบบ BIGCC มาใช้

ประเภทของผลกระทบ	**ปริมาณมลสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบแต่ละประเภท (จากการนำทางเลือกระบบ BIGCC มาใช้)**	
	ก่อนนำทางเลือกมาใช้ (1)	**หลังจากนำทางเลือกมาใช้ (2)**
Global Warming (CO_2-eq)	1,352,700.89	1,352,700.89
Acidification (SO_2-eq)	12,645.54	11,538.44
Eutrophication (PO_4-eq)	9,253.93	9,051.23
Smog (C_2H_4-eq)	4,795.31	1,720.37
Human Toxicity (DCB-eq)	35,174.29	20,019.13
Overall	1.94E-04	1.57E-04

จากตารางภาคผนวก ข-1 ประสิทธิภาพของทางเลือกการนำระบบ BIGCC มาใช้ในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก มีค่าเท่ากับปริมาณมลสารจากกรณีอ้างอิง (ก่อนนำทางเลือกมาใช้) ในช่องที่ (1) ของผลกระทบสภาวะโลกร้อนลบด้วยช่องที่ (2) ปริมาณผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังจากนำทางเลือกมาใช้ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบประเภทเดียวกัน จากนั้นนำไปคูณด้วย 100 และหารด้วยปริมาณมลสารช่องที่ (1) อีกครั้ง ดังนี้

EF (%) = [(1,352,700.89-1,352,700.89) × 100] ÷ 1,352,700.89

= 0

จากผลที่ได้ หมายถึง ทางเลือกระบบ BIGCC ที่ศึกษา และนำมาใช้เพื่อควบคุมมลสาร NO_x ที่เกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ไม่มีผลต่อการลดลงของก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน

ประสิทธิภาพของทางเลือกการนำระบบ BIGCC มาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะฝนกรด คำนวณได้จาก

EF (%) = [(12,645.54-11,538.44) × 100] ÷ 12,645.54

= 8.75

ประสิทธิภาพของทางเลือกการนำระบบ BIGCC มาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะการแพร่กระจายของพืชน้ำ คำนวณได้จาก

EF (%) = [(9,253.93-9,051.23) × 100] ÷ 9,253.93

= 2.19

ประสิทธิภาพของทางเลือกการนำระบบ BIGCC มาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะหมอกควันพิษ คำนวณได้จาก

EF (%) = [(4,795.31-1,720.37) × 100] ÷ 4,795.31

= 64.12

ประสิทธิภาพของทางเลือกการนำระบบ BIGCC มาใช้ในการลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ คำนวณได้จาก

EF (%) = [(35,174.29-20,019.13) × 100] ÷ 35,174.29

= 43.09

จากการนำระบบ BIGCC มาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยมลสารต่างๆ จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในครั้งนี้ทำให้ปริมาณมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมลดลง และมีประสิทธิภาพต่อการลดลงของผลกระทบโดยรวม (Overall) คำนวณได้จาก

EF (%) = [(1.94E-04-1.57E-04) × 100] ÷ 1.94E-04

= 19.21

ภาคผนวก ค

แบบสอบถาม

เรื่อง การลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ และการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน

คำชี้แจง กรุณาขีดเครื่องหมายถูก (✓) ลงในช่องหากทางเลือกดังกล่าวเป็นทางเลือกที่ทางโรงงานใช้เพื่อลดมลพิษอยู่ในปัจจุบัน และหากทางโรงงานมีทางเลือกอื่นโปรดกรอกข้อมูลไว้ในช่องที่เว้นไว้ให้

ทางเลือกเพื่อลดมลพิษจากกิจกรรมต่างๆ ดังนี้	รายละเอียด	โปรดขีดเครื่องหมายถูกลงในช่อง (✓)
การผลิตเยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการคราฟท์ ขั้นตอนการต้มเยื่อ (Pulp Cooking)		
1.condensate stripping	วิธีการแยกมลสาร TRS ออกจากกระแสก๊าซ หรือของเหลว โดยการผ่าน stripping column ซึ่งมี stripping solvent คอยจับ TRS	
2. white liquor and NaOH scrubber	เป็นการนำ NaOH มาใช้เป็น Scrubber ร่วมกันกับขั้นตอนการนำกลับคืนสารเคมี เพื่อลด TRS	
3. PTP and AQ (phase transition point and Anthraquinone)	วิธีการลด TRS ภายในหม้อต้มเยื่อ ซึ่งเป็นการควบคุมสภาวะของการต้มเยื่อ (phase transition cooking : PTC) ที่จุดเปลี่ยน (phase transition point: PTP) จาก Sulfur กลายเป็น Sulfide ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งใช้ Anthraquinone (AQ) เป็นสารตัวเร่ง	
4. Activated carbon absorption	เทคโนโลยีการดูดซับกลิ่นด้วยตัวดูดซับ ซึ่งกลิ่น หรือ TRS จะถูกดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) วิธีการดังกล่าว อาจต้องใช้ควบคู่กับระบบการกำจัด TRS แบบอื่นร่วมด้วย	
หากมีทางเลือกอื่นๆ		

ทางเลือกเพื่อลดมลพิษจากกิจกรรมต่างๆ ดังนี้	**รายละเอียด**	**โปรดขีดเครื่องหมายถูกลงในช่อง (✓)**
โปรดระบุ		
1.		
2.		
3.		
ขั้นตอนการฟอกเยื่อ (Pulp bleaching)		
1.ECF (C-E_o-D-D)	C= Chlorine gas E_o = ใช้ Sodium hydroxide (NaOH) ร่วมกับ ก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็นตัวทำปฏิกิริยา D= Chlorine dioxide	
2. ECF_{light} (D-E_{op}-D-D)	D = Chlorine dioxide E_{op} = ใช้ Sodium hydroxide (NaOH) ร่วมกับ ก๊าซออกซิเจน (O_2) และสารละลาย Hydrogen peroxide (H_2O_2) เป็นตัวทำปฏิกิริยา	
	ไม่มีการนำสารประกอบคลอรีนมาใช้ในการฟอก ลดมลสาร AOX ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทั้งหมด	
หากมีทางเลือกอื่นๆ โปรดระบุ		
1.		
2.		
3.		
ขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (Boiler)		
1. Natural gas	ใช้ก๊าซธรรมชาติแทนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (เปลือกไม้) เพื่อลดการเกิดฝุ่น	
2. Solar thermal system	ใช้ระบบความร้อนแสงอาทิตย์ เพื่อผลิตไอน้ำ และพลังงานความร้อน ลดการใช้เชื่อเพลิง และฝุ่น	
3. Solar Electricity	ใช้ความร้อนแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิง และฝุ่น	

ทางเลือกเพื่อลดมลพิษจากกิจกรรมต่างๆ ดังนี้	**รายละเอียด**	**โปรดขีดเครื่องหมายถูกลงในช่อง (✓)**
	ละออง	
4. BIGCC (Biomass gasification combined cycle)	ระบบการเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็งให้เป็นก๊าซแล้วนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อลดมลสารจากการเผาไหม้ เชื้อเพลิงชีวมวล	
5. Low NO_x Burner	เทคนิคการเผาไหม้เพื่อลดการเกิดมลสาร NO_x จากเตาเผา	
หากมีทางเลือกอื่นๆ โปรดระบุ		
1.		
2.		
3.		
ขั้นตอนการนำกลับคืนสารเคมี (Recovery boiler)		
1. Over fire air	ควบคุมสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำ โดยปรับปรุงการเผาไหม้บริเวณ boiler ด้วยการเพิ่มปริมาณอากาศทางเข้าของ boiler ให้มากกว่าภายใน boiler ส่งผลให้เกิดอากาศส่วนเกินภายนอกหม้อต้มไอน้ำ ทำให้ปริมาณ NO_x ลดลง	
2. BLGCC (black liquor gasification combined)	เทคนิคการเปลี่ยนเชื้อเพลิง black liquor ซึ่งเป็นของเหลวให้กลายเป็นก๊าซ เพื่อใช้กับ recovery boiler ซึ่งลดมลสารที่เกิดจากการเผาไหม้ black liquor ได้	
3. Increasing of dry solid content of black liquor (DS)	เทคนิคการเพิ่มความเข้มข้นของ black liquor ด้วยการทำระเหยเพื่อลด SO_2 และ TRS	
4.Electrostatic precipitator	เครื่องมือกำจัดฝุ่นละอองที่มีประสิทธิภาพสูง	

ทางเลือกเพื่อลดมลพิษจากกิจกรรมต่างๆ ดังนี้	**รายละเอียด**	**โปรดขีดเครื่องหมายถูกลงในช่อง (✓)**
5. Cyclone	เครื่องมือกำจัดฝุ่นละออง	
6. Bag filter	เครื่องมือกำจัดฝุ่นละออง	
หากมีทางเลือกอื่นๆ โปรดระบุ		
1.		
2.		
3.		
ขั้นตอนการเผาไหม้น้ำมันเตา (Lime kiln)		
1. Natural gas	แทนที่น้ำมันเตาด้วยก๊าซธรรมชาติ เพื่อลดมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้	
2. Scrubber	ใช้ scrubber เพื่อลดมลสาร SO_2 ที่เกิดขึ้นจากเตาเผา ในขั้นตอนการนำกลับคืนสารเคมี	
3. Selective catalytic reduction (SCR)	เป็นวิธีการใช้แอมโมเนีย (NH_3) ฉีดเข้าไปในก๊าซไอเสียเพื่อให้ NO_x ในก๊าซไอเสียเกิดปฏิกิริยา Reduction เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาช่วยทำให้ NO_x กลายเป็น N และ H_2O (น้ำ) ส่งผลให้ลดการเกิดมลสาร NO_x ได้	
4. Selective non-catalytic reduction (SNCR)	ใช้แอมโมเนียเป็น reducing agent ฉีดพ่นเข้าไปในไอเสียเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับ NO_x ในสถานะก๊าซให้กลายเป็น N โดยไม่ใช้ตัวเร่ง ซึ่งลด NO_x ได้	
หากมีทางเลือกอื่นๆ โปรดระบุ		
1.		
2.		
3.		
การผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ขั้นตอนการรีดน้ำออก (De-watering)		

ทางเลือกเพื่อลดมลพิษจากกิจกรรมต่างๆ ดังนี้	รายละเอียด	โปรดขีดเครื่องหมายถูกลงในช่อง (✓)
1.Additional vacuum extraction tank	ติดตั้งถังดูดสุญญากาศเพื่อรวบรวมน้ำจากกระบวนการรีดน้ำออก ซึ่งลด COD ได้	
2. Reducing seal water utilized in vacuum tank	เป็นวิธีการนำ seal water มาใช้ประโยชน์เพื่อการทำความสะอาดใน vacuum tank	
3. Reducing fresh water usage in felt showers	นำน้ำจาก felt showers มาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตกระดาษ	
4. Replacing of gland seals	ทดแทน gland seals ด้วย mechanical seals ซึ่งสามารถลดการรั่วซึมของน้ำได้	
5. Spillage collection	วิธีการเก็บ รวบรวมน้ำเสียจากการหกล้นในกระบวนการผลิต ทำให้ปริมาณ COD ลดลง	
หากมีทางเลือกอื่นๆ โปรดระบุ		
1.		
2.		
3.		
ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment)		
1. Activated Sludge (AS)	ระบบหมุนเวียนตะกอน ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพลด P และ COD ได้	
2. Activated Lagoon (AL)	ระบบบ่อเติมอากาศ ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพลด P และ COD ได้	
หากมีทางเลือกอื่นๆ โปรดระบุ		
1.		
2.		
3.		

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณตัวคูณการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting Factor) กับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

แบบ The Analytical Hierarchy Process: AHP

การคำนวณด้วยวิธี AHP คือ การพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ โดยยึดระดับโลก ภูมิภาค เป็นต้น เป็นเกณฑ์ในการให้ความสำคัญแก่ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (CIFOR, 1999) ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ยึดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระดับโลก ภูมิภาค และระดับท้องถิ่นเพื่อการศึกษา ซึ่งลำดับความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสามารถจัดเรียงตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ได้ ดังนี้ (Hermann *et al.,* 2006)

ระดับโลก = Global Warming>Acidification>Eutrophication>Smog>Human Toxicity

ระดับภูมิภาค = Acidification,Eutrophication>Smog,Human Toxicity>Global Warming

ระดับท้องถิ่น = Human Toxicity>Smog>Eutrophication>Acidification>Global Warming

ตัวอย่างการคำนวณตัวคูนการให้น้ำหนัก (Weighting Factor) ในครั้งนี้จะแสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นในระดับโลก ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

1.นำผลกระทบทั้ง 5 ประเภทมาเปรียบเทียบความสำคัญในรูปแบบ Matrix

ตารางภาคผนวก ง-1 ขั้นตอนแรกของการคำนวณ Weighting Factor ด้วยวิธี AHP

Impact	**GW**	**AD**	**EP**	**SM**	**HT**
GW	1	2	3	4	5
AD	1/2	1	2	3	4
EP	1/3	1/2	1	2	3
SM	1/4	1/3	1/2	1	2
HT	1/5	1/4	1/3	1/2	1
รวม	**2.3**	**4.1**	**6.8**	**10.5**	**15**

จากตารางภาคผนวก ง-1 แถวบนสุด และ Column ซ้ายมือสุดจะมีรูปแบบการกำหนดที่เหมือนกันทั้งหมด เพื่อจะได้นำเอาผลกระทบ แต่ละประเภทมาเปรียบเทียบกันได้ หากเปลี่ยนรูปแบบการเรียงผลกระทบที่แตกต่างออกไปก็ต้องให้ แถวบนสุด และ Column ซ้ายมือสุด มีรูปแบบการจัดเรียงที่เหมือนกันเช่นกัน

2. นำค่าที่รวมกันได้ในแต่ละ Column จากตาราภาคผนวก ง-1 หารด้วยค่าที่อยู่ในแต่ละเซลล์ ในขั้นตอนที่ 1 และรวมค่าที่ได้ในแต่ละแถว

ตารางภาคผนวก ง-2 ขั้นตอนที่สองของการคำนวณ Weight Factor ด้วยวิธี AHP

Impact	**GW**	**AD**	**EP**	**SM**	**HT**	**รวม**
GW	(1/2.3)0.4	(2/4.1)0.5	0.4	0.4	0.3	**2.1**
AD	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	**1.3**
EP	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	**0.8**
SM	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.5**
HT	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	**0.3**

3. นำผลรวมที่ได้ในแต่ละแถวจากขั้นตอนที่ 2 หารด้วยจำนวนประเภทผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่นำมาพิจารณา ผลที่ได้ คือ Weighting Factor (Vμ) ของแต่ละผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ตารางภาคผนวก ง-3 ขั้นตอนที่สามของการคำนวณ Weight Factor ด้วยวิธี AHP

Impact	**GW**	**AD**	**EP**	**SM**	**HT**	**รวม**	**Vμ**
GW	0.4	0.5	0.4	0.4	0.3	**2.1**	**(2.1/5) 0.42**
AD	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	**1.3**	**(1.3/5) 0.26**
EP	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	**0.8**	**0.16**
SM	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.5**	**0.10**
HT	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	**0.3**	**0.06**

การคำนวณค่าตัวคูณการให้น้ำหนัก Weighting Factor ของผลกระทบที่เกิดขึ้นในระดับภูมิภาค และระดับท้องถิ่นก็ทำเช่นเดียวกันกับระดับโลก เพียงแต่การเปรียบเทียบ ผู้คำนวณจะต้องไม่ลืมว่าลำดับความสำคัญของผลกระทบนั้นเปลี่ยนแปลงไป แม้ว่ารูปแบบการจัดเรียงของผลกระทบจะเหมือนเดิม ดังตารางภาคผนวก ง-4 และตารางภาคผนวก ง-5

ตารางภาคผนวก ง-4 Weighting Factor ของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระดับภูมิภาค (Regional)

Impact	**GW**	**AD**	**EP**	**SM**	**HT**	**Vµ**
GW	1	1/5	1/5	1/3	1/3	**0.06**
AD	5	1	1	3	3	**0.34**
EP	5	1	1	3	3	**0.34**
SM	3	1/3	1/3	1	1	**0.13**
HT	3	1/3	1/3	1	1	**0.13**
รวม	**17**	**2.87**	**2.87**	**8.30**	**8.30**	

ตารางภาคผนวก ง-5 Weighting Factor ของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระดับท้องถิ่น (Local)

Impact	**GW**	**AD**	**EP**	**SM**	**HT**	**Vµ**
GW	1	1/2	1/3	1/4	1/5	**0.06**
AD	2	1	1/2	1/3	1/4	**0.10**
EP	3	2	1	1/2	1/3	**0.16**
SM	4	3	2	1	1/2	**0.26**
HT	5	4	3	2	1	**0.42**
รวม	**15**	**10.50**	**6.83**	**4.08**	**2.28**	

ภาคผนวก จ

การคำนวณ
ปริมาณการดูดซับก๊าซ CO_2 จากต้นยูคาลิปตัส

การเจริญเติบโตของต้นไม้ (ยูคาลิปตัส) ต้องอาศัยก๊าซ CO_2 ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหาร ดังนั้น การนำกระดาษเสียกลับมาใช้ประโยชน์โดยการนำมาผลิตเยื่อ ส่งผลต่อการลดการตัดต้นยูคาลิปตัสลง ซึ่งหมายถึงปริมาณก๊าซ CO_2 ก็จะถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้นจากต้นยูคาลิปตัสที่ไม่ถูกตัดเพื่อการผลิตเยื่อกระดาษนั่นเอง (IPCC, 1997)

ปริมาณ C ที่ถูกดูดซับโดยยูคาลิปตัสต่อปี คำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$Cs = AP \times GP \times CP \qquad (จ\text{-}1)$$

โดย Cs คือ ปริมาณ C ที่ถูกดูดซับจากชีวมวลต่อปี (ton C/yr)

AP คือ พื้นที่ปลูกยูคาลิปตัส (Ha)

GP คือ อัตราการเจริญเติบโตของชีวมวลต่อปี (ton dry matter/ha/yr)

CP คือ สัดส่วนปริมาณ C ตามชนิดของพืช (ton C/ton dry matter)

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางภาคผนวก จ-1

ตารางภาคผนวก จ-1 ข้อมูลขาเข้าเพื่อการประเมินปริมาณ C จากการดูดซับด้วยยูคาลิปตัส

ตัวแปร	ปริมาณ	หน่วย	อ้างอิง
GP	17.4	ton dry matter/ha/yr	TEI (1997)
CP	0.5	ton C/ton dry matter	IPCC (1997)

ปริมาณพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสสามารถคำนวณได้ ดังนี้

กระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 5

กำลังการผลิตเยื่อกระดาษ 800,000 ตัน มีพื้นที่ปลูก 48,640 ha หาก ปริมาณเยื่อบริสุทธิ์ลดลงเหลือ 760,000 ตัน จะมีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั้งหมด (760,000×48,640)/800,000 = 46,208 ha

กระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 10

กำลังการผลิตเยื่อกระดาษ 800,000 ตัน มีพื้นที่ปลูก 48,640 ha หาก ปริมาณเยื่อบริสุทธิ์ลดลงเหลือ 720,000 ตัน จะมีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั้งหมด (720,000×48,640)/800,000 = 43,776 ha

กระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 20

กำลังการผลิตเยื่อกระดาษ 800,000 ตัน มีพื้นที่ปลูก 48,640 ha หาก ปริมาณเยื่อบริสุทธิ์ลดลงเหลือ 640,000 ตัน จะมีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั้งหมด (640,000×48,640)/800,000 = 38,912 ha

ปริมาณพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสที่คำนวณได้จะถูกนำมาลบออกจากพื้นที่เดิมที่ปลูกจากกำลังการผลิต 800,000 ตัน ก่อนนำไปคำนวณในสมการที่ (1) ดังตารางภาคผนวก จ-2

ตารางภาคผนวก จ-2 ปริมาณ C ที่ถูกดูดซับจากต้นยูคาลิปตัส

ตัวแปร	**สัดส่วนกระดาษเสีย**	**พื้นที่ปลูกยูคาลิปตัส (ha)**	**ปริมาณ C ที่ถูกดูดซับ (ton C/yr)**
AP	5	2,432	21,158.4
	10	4,864	42,316.8
	20	9,728	84,633.6

ปริมาณ C ที่ถูกดูดซับด้วยยูคาลิปตัสจะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ CO_2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$CO_2 = Cs \times (44/12) \qquad (จ\text{-}2)$$

โดย CO_2 คือ ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซับ (ton/yr)

44 คือ มวลโมเลกุลของ CO_2 (IPCC, 2006)

12 คือ มวลโมเลกุลของ C (IPCC, 2006)

ดังนั้น ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซับด้วยยูคาลิปตัสตามสัดส่วนของพื้นที่ที่ลดลงจากการนำกระดาษเสียกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตเป็นเยื่อกระดาษส่งผลต่อการลดปริมาณก๊าซ CO_2 ได้ แสดงดังตารางภาคผนวก จ-3

ตารางภาคผนวก จ-3 ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซับจากต้นยูคาลิปตัส

สัดส่วนกระดาษเสียร้อยละ	**ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซับ (ton/yr)**
5	77,580.8
10	155,161.6
20	310,323.2

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณ
ปริมาณการปลดปล่อยมลสารจากการใช้ปุ๋ย

ปริมาณปุ๋ยที่นำมาใช้ระหว่างการปลูกต้นยูคาลิปตัสก่อนนำไปผลิตเป็นเยื่อกระดาษเท่ากับ 72.5 กรัม/ต้น/4 ปี หากสามารถนำวัตถุดิบอย่างอื่นในที่นี้ คือ กระดาษเสีย มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเยื่อที่ผลิตจากยูคาลิปตัส ปริมาณการตัดต้นยูคาลิปตัสก็จะลดลง ส่งผลดีต่อการเพิ่มปริมาณการดูดซับ CO_2 ในชั้นบรรยากาศได้ ในขณะที่มลสารต่างๆ จากปุ๋ยที่ใส่ต้นยูคาลิปตัสยังคงถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมอยู่ เช่น N_2O NO_x และ PO_4^{3-} โดยสูตรปุ๋ยที่ใช้ในการใส่ต้นยูคาลิปตัสในการศึกษาครั้งนี้ คือ 18-18-14 ซึ่งมลสารต่างๆ เหล่านี้มีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม คือ สภาวะโลกร้อน สภาวะฝนกรด สภาวะการแพร่กระจายของพืชน้ำ สภาวะหมอกควันพิษ และสภาวะความเป็นพิษต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

กระดาษเสียที่นำมาแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 20 ทำให้ลดจำนวนการตัดต้นยูคาลิปตัสลงได้ จากเดิมที่มีการตัดต้นยูคาลิปตัส 80,864,000 ต้น เมื่อมีการนำกระดาษเสียมาเป็นวัตถุดิบแทนที่เยื่อยูคาลิปตัส ส่งผลให้ปริมาณยูคาลิปตัสที่ไม่ถูกตัดไปเพื่อผลิตเยื่อคิดเป็น 4,043,200 ต้น 8,086,400 ต้น และ 16,172,800 ต้น ตามลำดับ ปริมาณปุ๋ย รวมถึงมลสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะยกตัวอย่างแสดงให้เห็นที่สัดส่วนการนำกระดาษเสียมาแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสที่สัดส่วนร้อยละ 5 ดังนี้

กระดาษเสียที่นำมาแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสที่สัดส่วนร้อยละ 5 ทำให้ต้นยูคาลิปตัสเท่ากับ 4,043,200 ต้น ไม้ถูกตัดแต่ยังคงใส่ปุ๋ยคิดเป็น 18.13 กรัม/ต้น เพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้นปริมาณปุ๋ยทั้งหมดที่ใช้ คือ

$4,043,200 \times 18.13 = 73303216$ กรัม/ปี หรือเท่ากับ 73.30 ตัน/ปี

และคิดเป็นปริมาณปุ๋ย N และปุ๋ย P จากสูตรปุ๋ยที่นำมาใช้ คือ 18-18-14 ดังนี้

ปุ๋ย N = $(73.30 \times 18)/100 = 13.19$ ตัน/ปี

ปุ๋ย P = $(73.30 \times 18)/100 = 13.19$ ตัน/ปี

ซึ่งปุ๋ยที่ใส่เพื่อการเจริญเติบโตของยูคาลิปตัสก่อให้เกิดการปลดปล่อย N_2O NO_x และ PO_4^{3-} ดังตารางภาคผนวก ฉ-1

ตารางภาคผนวก ฉ-1 ค่าการปลดปล่อยมลสารจากการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 5

มลสาร	ค่าตัวคูณการก่อมลพิษ (kg/kg-N,P)	ปริมาณปุ๋ย (ton/yr)	ปริมาณมลพิษ (ton/yr)
N_2O	0.03	13.19	0.40
NO_x	0.025	13.19	0.33
PO_4^{3-}	0.2	13.19	2.64

สำหรับสัดส่วนร้อยละ 10 และ 20 ของกระดาษเสียที่นำมาแทนที่เยื่อยูคาลิปตัส แสดงดังตาราง ภาคผนวก ฉ-2

ตารางภาคผนวก ฉ-2 ค่าการปลดปล่อยมลสารจากการแทนที่เยื่อยูคาลิปตัสด้วยกระดาษเสียที่สัดส่วนร้อยละ 10 และ 20

จำนวนต้น	ปริมาณปุ๋ย	ปริมาณปุ๋ยทั้งหมด	ปริมาณปุ๋ย (ton/yr)		องค์ประกอบของมลพิษ (ton/yr)		
	(g/tree)	(ton/yr)	N	P	N_2O	NO_x	PO_4^{3-}
8,086,400	18.13	146.61	26.39	26.39	0.79	0.66	5.28
16,172,800	18.13	293.21	52.78	52.78	1.58	1.32	10.56

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวธนิดา แซ่ตัน

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010920009

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

ธนิดา แซ่ตัน, สุเมธ ไชยประพัทธ์, ธันวดี เตชะภัททวรกุล สุขสาโรจน์ และ วาริท เจาะจิตต์. 2552. "การประเมินวัฏจักรชีวิตทางสิ่งแวดล้อมของกระดาษพิมพ์เขียนที่ผลิตจากเยื่อกระดาษคราฟท์ยูคาลิปตัส", **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 14**, ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระหว่างวันที่ 10-11 กันยายน 2552.