การศึกษาต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ด

ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย

นางสาวปรียานุช แช่มศิริวัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GREENHOUSE GAS ABATEMENT COST OF CLINKER SUBSTITUTE IN THAILAND CEMENT INDUSTRY

Miss Preeyanuj Chaemsiriwat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Energy Technology and Management
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย
โดย	นางสาวปรียานุช แช่มศิริวัฒน์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเนตร ชุตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรธนะเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร. วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ณัฐพงษ์ ชยวัฒโฑ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปรียานุช แช่มศิริวัฒน์ : การศึกษาต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย (GREENHOUSE GAS ABATEMENT COST OF CLINKER SUBSTITUTE IN THAILAND CEMENT INDUSTRY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์, 117 หน้า.

การวิจัยนี้ศึกษาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวการนำเถ้าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย ประกอบไปด้วย เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำการศึกษาโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีที่อัตราค่าใช้จ่ายในปัจจุบัน กรณีที่มีการซื้อขาย และกรณีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นในอนาคต

การวิเคราะห์จะเป็นไปตามทฤษฎีของต้นทุนและประโยชน์ที่เกิดขึ้น ส่วนของต้นทุน คือ ต้นทุนของเถ้ารวมกับค่าขนส่ง ส่วนของประโยชน์ที่เกิดขึ้นคือ ต้นทุนการดำเนินงานที่เกิดจากปริมาณปูนเม็ดที่ลดลง จะวิเคราะห์ที่อัตราส่วน 1:1 คือปริมาณปูนเม็ดลดลง 1 ตันเท่ากับใช้ปริมาณวัสดุทดแทนปูนเม็ด 1 ตัน ปริมาณปูนเม็ดที่ลดลงเป็นข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยอื่นที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว

ผลการวิเคราะห์พบว่าต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้ง 3 กรณี นั้นมีต้นทุนต่ำ โดยผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 กรณี เถ้าที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดคือเถ้าชานอ้อย เถ้าลอยและเถ้าปาล์มน้ำมัน ผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ 1 มีต้นทุนเท่ากับ -4596.30 THB/t_{CO2} ,-3533.24 THB/t_{CO2} และ-3265.21 THB/t_{CO2} ตามลำดับ ในกรณีที่ 2 มีต้นทุนเท่ากับ -4390.24 THB/t_{CO2} , -3533.24 THB/t_{CO2} และ-3059.15 THB/t_{CO2} ตามลำดับ ในกรณีที่ 3 มีต้นทุนเท่ากับ -2944.17 THB/t_{CO2} ,-1311.81 THB/t_{CO2} และ -408.75 THB/t_{CO2} ตามลำดับ และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ อัตราค่าขนส่ง การวิเคราะห์หาระยะทางการขนส่งที่ไกลที่สุดที่จะไม่ทำให้ต้นทุนมากกว่าศูนย์ พบว่าในกรณีที่1 และ 2 มีระยะทางการขนส่งที่ค่อนข้างครอบคลุมทุกเส้นทางการขนส่ง ส่วนในกรณีที่ 3 นั้นเส้นทางในการขนส่งบางเส้นทางที่มีระยะทางไกลนั้นไม่สามารถนำไปใช้ได้ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อต้นทุน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นโรงงานปูนซีเมนต์ยังสามารถเลือกรับซื้อเถ้าจากพื้นที่ใกล้เคียงได้

โดยสรุปแล้วแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นแนวทางที่มีต้นทุนต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งถือได้ว่าเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ ควรมีการสนับสนุนให้มีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ประกอบการและผู้บริโภค

สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

5787566320 : MAJOR ENERGY TECHNOLOGY AND MANAGEMENT
KEYWORDS: ABATEMENT COST / CLINKER SUBSTITUTION / CEMENT

PREEYANUJ CHAEMSIRIWAT: GREENHOUSE GAS ABATEMENT COST OF CLINKER SUBSTITUTE IN THAILAND CEMENT INDUSTRY. ADVISOR: WEERIN WANGJIRANIRAN, Ph.D., 117 pp.

This research study the CO_2 abatement costs by using ash waste from industrial as a clinker substitution in Thailand cement industry with consists of fly ash, bagasse ash and palm oil fuel ash. The study is divided into three cases, First, the case that in the current rates. Second, the case of trading and third in case higher costs in the future

The analysis based on the theory of cost and benefit. Part of the cost is the cost of ash combined with transportation rate. Part of the benefit is operating costs resulting from a reduced quantity of clinker and assumption is the quantity of clinker reduces to 1 ton is equal to 1 ton of ash used as a clinker substitution.

Result of the CO_2 abatement cost of all 3 cases, the ash has the lowest cost is bagasse ash and fly ash. The ash has the highest cost is palm oil fuel ash. Result of case 1 is -4596.30 THB/t_{CO2}, -3533.24 THB/t_{CO2} and -3265.21 THB/t_{CO2} respectively. Result of case 2 is -4390.24 THB/t_{CO2} , -3533.24 THB/t_{CO2} and -3059.15 THB/t_{CO2} respectively. Result of case 3 is -2944.17 THB/t_{CO2},-1311.81 THB/t_{CO2} and -408.75 THB/t_{CO2} respectively. The factors are most affected to the changes of CO_2 abatement cost is transportation rate. The result from maximum distance analysis of all three cases, Found that incase 1 and 2 the almost covers all route to transport. But in case 3 some routes to transport have distances more than maximum distance

In summary, the using ash as a clinker substitute material in Thailand cement industry is the low cost and effective approach. There should be a policy to encourage the industrial standards for cement with each ash to build confidence with the operators and consumers

Field of Study: Energy Technology and Management Student's Signature .....
Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไปมิได้เลยหากปราศจากความอนุเคราะห์ การสนับสนุนส่งเสริมจากบุคคลผู้ทรงเกียรติและหน่วยงานต่างๆทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ อาทิเช่น กระทรวงพลังงาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม หน่วยงานและโรงงานอื่นๆที่ร่วมสงเสริมสนับสนุนข้อมูลและคำชี้แนะเพื่ออำนวยการให้งานวิจัยผ่านพ้นสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณคณาจารย์ นักวิจัย เพื่อนนิสิต รุ่นพี่และรุ่นน้อง ตลอดจนเจ้าหน้าที่หลักสูตรสาขาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีส่วนช่วยเหลือให้คำแนะนำสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานวิจัยครั้งนี้ทั้ง นายวิษณุ สายรัตนทองคำ และ นางสาวสุรัชชา พิชัยชาญเลิศ ที่คอยสนับสนุนช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และร่วมฝ่าฟันอุปสรรคมาด้วยกันเสมอ

กราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จและราบรื่นไปได้ด้วยดีตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการวิจัยครั้งนี้

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงศา พรชัยวิเศษกุล ที่ให้คำชี้แนะและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยและให้สนับสนุนด้วยดีเสมอมา

กราบขอบพระคุณ ดร.วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งคอยสนับสนุน ส่งเสริม ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตลอดระยะเวลาการศึกษาวิจัย จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ คอยสนับสนุนส่งเสริม ช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเสร็จสิ้นบรรลุวัตถุประสงค์ทุกประการ

สิ่งที่เป็นคุณความดีและคุณประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีต่อผู้วิจัยในครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 3

1.3 ขอบเขตการศึกษา 3

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

1.6 คำย่อและคำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย 6

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 การผลิตปูนซีเมนต์ 7

2.2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ 15

2.3 แนวคิดการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ 16

2.4 ศักยภาพและคุณสมบัติของเถ้าที่สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด 17

2.5 ขั้นตอนการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด 20

2.6 แนวคิดการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 21

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 23

2.8 สรุปแนวคิด นโยบายและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 30
3.1 การคิดต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30
3.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลด 53
3.3 การวิเคราะห์ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้า 54
3.4 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย 55
บทที่ 4 ผลการศึกษา 56
4.1 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 58
4.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 63
4.3 การวิเคราะห์ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด 68
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 80
5.1 บทสรุป 80
5.2 ข้อเสนอแนะ 82
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม 83
รายการอ้างอิง 84
ภาคผนวก ก รายชื่อโรงงานที่ใช้เป็นข้อมูลในงานวิจัย 86
ภาคผนวก ข เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์ 91
ภาคผนวก ค อภิธานศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 117

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ระยะทางเฉลี่ยที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด โดยวิธีการถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก 39
ตารางที่ 2 ต้นทุนการดำเนินงานจากการนำเถ้าแต่ละชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด 40
ตารางที่ 3 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินไปยังโรงงานปูนซีเมนต์..... 45
ตารางที่ 4 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลไปยังโรงงานปูนซีเมนต์1/3.. 47
ตารางที่ 5 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงไฟฟ้าชีวมวลไปยังโรงงานปูนซีเมนต์... 51
ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลและที่มาของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย..... 55
ตารางที่ 7 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด 57
ตารางที่ 8 ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีที่ 1..... 58
ตารางที่ 9 ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีที่ 2..... 59
ตารางที่ 10 ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีที่ 3..... 60
ตารางที่ 11 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 1 68
ตารางที่ 12 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 2..... 69
ตารางที่ 13 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 3..... 70
ตารางที่ 14 เส้นทางการขนส่งเถ้าลอยที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3 72
ตารางที่ 15 เส้นทางการขนส่งเถ้าชานอ้อยที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3 (1/3) 74
ตารางที่ 16 เส้นทางการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3..... 78

สารบัญรูป

รูปที่ 1 แสดงกรรมวิธีการผลิตซีเมนต์แบบเปียก ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด 9
รูปที่ 2 แสดงกรรมวิธีการผลิตซีเมนต์แบบผสมแห้ง ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด 10
รูปที่ 3 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้งและแบบเปียก 11
รูปที่ 4 แผนที่แสดงบริเวณพื้นที่ที่มีการผลิตปูนซีเมนต์ 14
รูปที่ 5 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคอุตสาหกรรม 15
รูปที่ 6 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ 16
รูปที่ 7 บริเวณบ่อทิ้งเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 18
รูปที่ 8 กองเถ้าชานอ้อยก่อนเผา และบ่อทิ้งเถ้าชานอ้อย 19
รูปที่ 9 กากปาล์มน้ำมันก่อนการเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิง และ เถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากการเผา 20
รูปที่ 10 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง 21
รูปที่ 11 แสดงเส้นต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลก เวอร์ชั่น 2 22
รูปที่ 12 เส้นโค้งแสดงการประมาณศักยภาพสูงสุดของการลดก๊าซเรือนกระจกจากมาตรการต่างๆสำหรับภาคอุตสาหกรรมซีเมนต์ 28
รูปที่ 13 รถไซโลหรือรถบัลค์ที่ใช้ในการขนส่งเถ้า 37
รูปที่ 14 แผนภาพแสดงกระบวนการที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ 42
รูปที่ 15 ตัวอย่างระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะจังหวัดลำปาง 44
รูปที่ 16 ตัวอย่างระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากบริษัท สหเรือง จำกัด จังหวัดมุกดาหาร ไปยัง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด-จังหวัดสระบุรี 46
รูปที่ 17 ตัวอย่างระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจากบริษัท ศรีไสวคลีนพาวเวอร์ จำกัด จังหวัดกระบี่ ไปยัง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด-จังหวัดสระบุรี 50
รูปที่ 18 เส้นต้นทุนการลดการปล่อย CO_2 เปรียบเทียบกับศักยภาพการลด CO_2 จากการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด 62
รูปที่ 19 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าลอย 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 20 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าชานอ้อย 64
รูปที่ 21 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าปาล์มน้ำมัน 65
รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ของระยะทางการขนส่งที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลกับต้นทุนการลด CO_2 66
รูปที่ 23 ตำแหน่งของโรงงานปูนซีเมนต์และโรงไฟฟ้าถ่านหินตามพื้นต่างๆ 71
รูปที่ 24 ตำแหน่งของโรงงานปูนซีเมนต์และโรงไฟฟ้าชีวมวลของเถ้าชานอ้อยตามพื้นต่างๆ 73
รูปที่ 25 ตำแหน่งของโรงงานปูนซีเมนต์และโรงไฟฟ้าชีวมวลของเถ้าปาล์มน้ำมันตามพื้นต่างๆ 77
รูปที่ 26 การจัดโซนพื้นที่ของโรงงานปูนซีเมนต์ในการนำเถ้าแต่ละชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด 82

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาจากกระบวนการผลิตจำนวนมาก จากปริมาณความต้องการที่เพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของประเทศ และการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน ทำให้มีการผลิตปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นซึ่งก็จะส่งผลให้ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมามากขึ้นตามไปด้วย ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมานั้น ส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกมาจากขั้นตอนการเผาไหม้ กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก(Wet Process) กระบวนการผลิตแบบกึ่งแห้งหรือแบบเผาหมาด(Semi-Dry Process) และ กระบวนการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) ทั้ง 3 กรรมวิธีการผลิตมีหลักการเหมือนกัน คือ นำวัตถุดิบมาเคล้าให้เข้ากัน หลังจากนั้นทำการแยกออกจากกันโดยการเผาไม้ที่อุณหภูมิ 1,200 °C -1,400 °C เพื่อให้ได้ปูนเม็ด (Clinker) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก [1]

จากรายงานขององค์การพลังงานระหว่างประเทศ หรือ International Energy Agency (IEA) พบว่าอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ทั่วโลกมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงประมาณ 5% และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาจำนวนมาก IEA จึงได้ร่วมกับสภานักธุรกิจโลกเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน กลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ หรือ World Business Council for Sustainable Development's Cement Sustainability Initiative (WBCSD CSI) ออกมาตรการและแนวทางในการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกที่เรียกว่า Cement Technology Roadmap 2009 Carbon Emission Reductions up to 2050 โดยได้นำเสนอเทคโนโลยีที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาดังนี้ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนและไฟฟ้า การใช้พลังงานทดแทน การใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ [2]

งานวิจัยต่างๆในประเทศไทยที่เกี่ยวกับวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนเม็ดนั้น ได้นำเสนอวัสดุที่น่าสนใจไว้หลายชนิด เช่น เถ้าลอยถ่านหิน (Fly ash or Pulverized fuel ash) หมายถึงเถ้าที่เกิดจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต เถ้าชีวมวล (Biomass Ash) หรือเถ้าที่เป็นขยะเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการใช้วัสดุทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล และยังไม่มีแนวทางในการกำจัดทิ้งหรือการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ เกิดเป็นขยะจำนวนมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น เช่น เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse ash or Bagasse fly

ash) ที่เกิดจากการใช้กากอ้อยที่เหลือจากการผลิตน้ำตาลเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เถ้าลอยปาล์มน้ำมันที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม (Palm oil fuel ash or palm oil fuel fly ash) แล้วนำกากปาล์มที่เหลือไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เถ้าลอยต่างๆเหล่านี้เมื่อนำไปผสมกับปูนเม็ดในอัตราส่วนที่เหมาะสมก็สามารถนำไปใช้งานเป็นปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆได้ [3]

เถ้าถ่านหินที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดได้นั้น จะต้องเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กหรือเรียกได้อีกอย่างว่าเถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งเป็นเถ้าที่เกิดจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ปัจจุบันโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาดใหญ่ในประเทศไทยมีอยู่ 2 ที่ คือโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงไฟฟ้าถ่านหิน บริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด จังหวัดระยอง และจากข้อมูลจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2558-2579 หรือ Thailand Power Development Plan 2015-2036 (PDP2015) ที่ได้มีการกำหนดแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย สรุปได้โดยสังเขปว่าจะมีโรงไฟฟ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นดังนี้ คือในปีพ.ศ. 2562 โรงไฟฟ้าถ่านหินกระบี่ กำลังผลิตไฟฟ้าสุทธิ 800 เมกะวัตต์ ปี พ.ศ. 2564 โรงไฟฟ้าถ่านหินเทพา เครื่องที่ 1 กำลังผลิตไฟฟ้าสุทธิ 1,000 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2567 โรงไฟฟ้าถ่านหินเทพา เครื่องที่ 2 กำลังผลิตไฟฟ้าสุทธิ 1,000 เมกะวัตต์ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเถ้าลอยถ่านหินที่เกิดจากโรงไฟฟ้าถ่านหินนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้น [4]

เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยปาล์มน้ำมันเป็นเถ้าที่เป็นขยะเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตไฟฟ้า อีกทั้งข้อมูลจากรายงานแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 หรือ Alternative Energy Development Plan2015 (AEDP2015) พบว่ามีการกำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน (Alternative Fuel) ในส่วนของการผลิตเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการขนส่งทั้งไบโอดีเซลและเอทานอล ซึ่งในส่วนนี้มีการคาดการณ์ผลผลิตของปาล์มน้ำมันและอ้อยที่จะเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงปริมาณของเถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยปาล์มน้ำมันที่จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเถ้าทั้ง 2 ชนิดนี้ในปัจจุบันยังไม่มีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทำให้เกิดปัญหาด้านการกำจัดทิ้ง จึงมีความคิดที่ว่าหากนำเถ้าทั้งสองชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดแล้วนั้น นอกจากจะเป็นการหาแนวทางในการเพิ่มมูลค่าและเป็นแนวทางในการกำจัดทิ้ง อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์อีกด้วย [5]

หากในอนาคตมีการผลักดันมาตรการให้มีการนำเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เพื่อช่วยในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อสงสัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของแนวทางดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะวิเคราะห์หาต้นทุนของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรม

ปูนซีเมนต์ของประเทศไทย นอกจากจะแสดงให้เห็นถึงต้นทุนที่ใช้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางดังกล่าวแล้วนั้น ยังแสดงให้เห็นถึงภาระที่จะเกิดขึ้นกับผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ว่ามีมากน้อยเพียงใด อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมและสนับสนุนให้แนวทางดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและประเมินความคุ้มค่าของต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย

1.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 พิจารณาวัสดุทดแทนปูนเม็ดที่นำมาวิเคราะห์ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนี้
- เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต
- เถ้าลอยชานอ้อยจากการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล
- เถ้าลอยปาล์มน้ำมันจากการใช้กากของผลปาล์มน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม

1.3.2 คำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซเรือนกระจก เฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการนำวัสดุทดแทนปูนเม็ดมาใช้ จะวิเคราะห์เฉพาะขั้นตอนการนำเถ้าแต่ละชนิดมาผ่านกระบวนการบด เพื่อให้ได้เถ้าที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมก่อนนำไปผสมกับปูนเม็ด ไม่รวมกระบวนการอื่นๆที่เป็นขั้นตอนในการผลิตปูนซีเมนต์

1.3.4 ต้นทุนที่ใช้วิเคราะห์เป็นต้นทุนของอัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าแต่ละชนิด ส่วนประโยชน์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าใช้จ่ายการดำเนินงานที่เกิดขึ้นจากการลดการใช้ปูนเม็ด

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

กระบวนการที่ 1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูล

1.4.1 ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

1.4.2 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ รวมถึงแนวทางการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.4.3 ศึกษาขั้นตอนการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดรวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอน

1.4.4 รวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยปาล์มน้ำมันชนิดที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด โดยขอข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ การเก็บข้อมูลจากโรงงานผู้ผลิต และข้อมูลการวิเคราะห์อื่นๆ

กระบวนการที่ 2 การวิเคราะห์

1.4.5 กำหนดสมมติฐานการวิเคราะห์หาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ

กรณีที่ 1 มูลค่าในปัจจุบัน คือ ราคาเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน รวมถึงอัตราค่าขนส่ง อ้างอิงตามข้อมูลในปี พ.ศ. 2558

กรณีที่ 2 เมื่อมีการซื้อขายทำให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น คือ อัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยปาล์มน้ำมันมีค่าเท่ากับราคาเถ้าลอยถ่านหิน อ้างอิงตามข้อมูลของราคาเถ้าลอยในปี พ.ศ.2558

กรณีที่ 3 มีมูลค่าเพิ่มขึ้นในอนาคต คือ อัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าในอนาคตมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากการซื้อขายเพิ่มสูงขึ้นและราคาค่าเชื้อเพลิงในการขนส่งมีค่าสูงขึ้น โดยกำหนดให้ราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งของเถ้าทั้ง 3 ชนิดมีมีค่าเท่ากัน

1.4.6 คำนวณหาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เถ้าเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

1.4.7 การสรุปผลจะอยู่ในรูปของเส้นกราฟต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับศักยภาพปริมาณการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการนำเถ้าแต่ละชนิดมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยอื่นที่ได้รับการตีพิมพ์ ระยะเวลาที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าว อ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579 (PDP2015) คือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2579 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 21 ปี

1.4.8 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.4.9 คำนวณหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าจากโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้ระยะทางการขนส่งที่จะไม่ส่งผลกระทบทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กระบวนการที่ 3 การสรุปผลการวิจัยและเผยแพร่

1.4.10 สรุปผลงานวิจัย อุปสรรคและข้อเสนอแนะจากการศึกษาและนำมาตรการมาปรับใช้

1.4.11 เผยแพร่งานวิจัย

1.4.12 เสร็จสิ้นกระบวนการวิจัย

แผนภาพการดำเนินการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงศักยภาพและต้นทุนของการลดก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย

1.5.2 ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย

1.6 คำย่อและคำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

1.6.1 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly ash or Pulverized fuel ash) คือ เถ้าที่ได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน

* ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ชื่อย่อว่า เถ้าลอย

1.6.2 เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse Fly Ash) คือ เถ้าที่ได้จากการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวลหรือโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตไฟฟ้า

* ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ชื่อย่อว่า เถ้าชานอ้อย

1.6.3 เถ้าลอยปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Fly Ash) คือ เถ้าที่ได้จากการใช้ทะลายปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวลหรือโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตไฟฟ้า

* ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ชื่อย่อว่า เถ้าปาล์มน้ำมัน

1.6.4 ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 abatement cost) คือ ต้นทุนต่อหน่วยสำหรับการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะวิเคราะห์จากแนวทางการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด มีหน่วยเป็นบาทต่อหนึ่งตันคาร์บอนไดออกไซด์ (THB/t_{CO2})

1.6.5 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง (Maximum Distance) คือ ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งที่ไกลที่สุด มีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km) ที่จะไม่ทำให้ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าศูนย์ (AC > 0)

1.6.6 หน่วย ตัน ที่ใช้ในงานวิจัยจะแทนด้วย t โดยจะแบ่งออกเป็น 3 หน่วยด้วยกันคือ

- t_{CO2} คือ ตันคาร์บอนไดออกไซด์
- $t_{Clinker}$ คือ ตันปูนเม็ด
- t_{Ash} คือ ตันของเถ้าแต่ละชนิด

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตปูนซีเมนต์

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และยังเป็นปัจจัยหลักในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ทั้งในโครงการการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานของประเทศและการลงทุนในธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ จากรายงานสรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2558 และแนวโน้มปี 2559 ของสำนักงานเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม สรุปได้ว่า แม้ในปี 2558 อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์จะหดตัวลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการชะลอตัวลงของเศรษฐกิจ ทำให้ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์และผู้บริโภคชะลอการลงทุนลง เนื่องจากไม่มั่นใจในเศรษฐกิจของประเทศ แต่แนวโน้มในปี 2559 คาดว่าจะดีขึ้น เนื่องจากนโยบายกระตุ้นเศรษฐกิจของภาครัฐ เช่น โครงการการขยายเส้นทางการเดินรถไฟฟ้า ส่งผลทำให้พื้นที่บริเวณแนวเส้นทางรถไฟฟ้ามีการลงทุนในธุรกิจอสังหาริมทรัพย์เพิ่มขึ้น เพราะราคาที่ดินบริเวณดังกล่าวจะมีราคาต่ำกว่าที่ดินในเมือง แม้การจำหน่ายในประเทศจะลดลงแต่ในด้านการส่งออกปูนซีเมนต์ไปยังประเทศเพื่อนบ้านนั้นแนวโน้มที่ดีขึ้น สาเหตุมาจากแต่ละประเทศล้วนมีการขยายตัวของเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง โดยตลาดการส่งออกอันดับหนึ่งของไทย คือ เมียนมาร์ รองลงมา คือ กัมพูชา ลาว บังคลาเทศและอินโดนีเซีย ตามลำดับ [6] จากแนวโน้มในปี 2559 เห็นได้ชัดว่าปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์จะเพิ่มสูงขึ้นตามความต้องการที่มากขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย

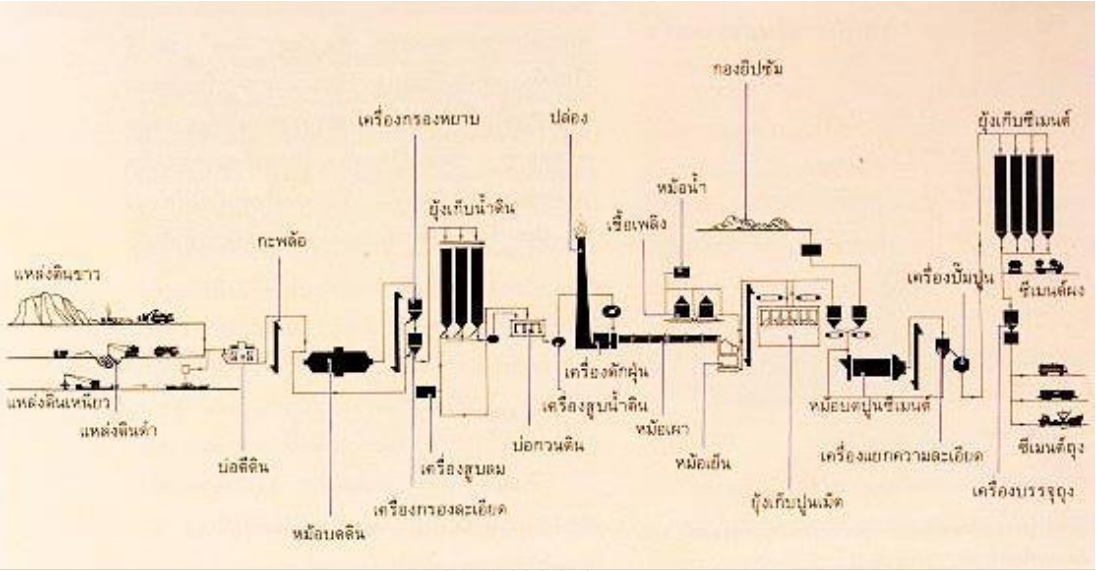
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจะเกิดในระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งมีลักษณะกรรมวิธีการผลิต 3 กรรมวิธีด้วยกัน คือ

1. กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
2. กรรมวิธีการผลิตแบบกึ่งแห้งหรือแบบเผาหมาด (Semi-Dry Process) และ
3. กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

โดยการผลิตปูนซีเมนต์ในระดับอุตสาหกรรมจะมีการใช้กรรมวิธีการผลิตอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ กรรมวิธรการผลิตแบบเปียกและกรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก

เริ่มโดยการนำวัตถุดิบแต่ละชนิดใส่ลงไปในบ่อปูน เติมน้ำเพื่อล้างวัตถุดิบ (wash mill) แล้วส่งไปยังหม้อบด (ball mill) เมื่อวัตถุดิบถูกบดละเอียดดีแล้วจะไปที่เครื่องกรองหยาบส่วนที่ ละเอียดใช้ได้จะผ่านไปยังเครื่องกรองละเอียด ส่วนที่หยาบไม่สามารถผ่านเครื่องกรองหยาบได้ จะถูกส่งกลับไปยังหม้อบดอีกครั้ง และเมื่อวัตถุดิบผ่านเครื่องกรองละเอียดแล้วจะถูกส่งเข้าไป เก็บในถังเก็บ (slurry storage tank) ซึ่งจะกวนผสมไปจนกว่าส่วนผสมทั้งหมดจะเข้ากันได้ดี ตามต้องการ ของเหลวในบ่อกวนจะมีลักษณะค่อนข้างข้นคล้ายน้ำโคลนเรียกว่า น้ำซีเมนต์ (slurry) ซึ่งมีน้ำผสมอยู่ประมาณร้อยละ 30 – 50 ความละเอียดของน้ำซีเมนต์ถ้ากรองด้วย ตะแกรงขนาด 170 เมช (mesh) จะมีส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรง (residue on mesh) ไม่เกินร้อยละ 2 โดยทั่วไปในโรงงานจะมีถังเก็บน้ำซีเมนต์ (storage tanks) เป็นจำนวนมาก โดยน้ำซีเมนต์ที่เก็บไว้นี้จะต้องกวนอยู่ตลอดเวลาเพื่อไม่ให้ตกตะกอน ต่อจากนั้นน้ำซีเมนต์จะถูกส่งไปยังเครื่องป้อน (slurry feeder) เพื่อเข้าเตาเผา (rotary kiln) ทางด้านบน ลักษณะของเตาเผาเป็นเตาขนาดใหญ่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15 ฟุต (4.5 เมตร)ยาวประมาณ 500 ฟุต (150 เมตร) ภายนอกทำด้วยโลหะผสม ภายในกรุด้วยวัตถุ- ทนไฟ 3 ชั้น คือชั้นนอกสุดเป็นอิฐแดง ชั้นกลางเป็นอิฐฉนวน (insulating bricks) ชั้นในสุด เป็นอิฐทนไฟ (fire clay bricks) เตาเผาซีเมนต์จะอยู่ในลักษณะลาดเอียงและหมุนอย่างช้า ๆ 57 ประมาณ 3 – 5 รอบต่อนาที เชื้อเพลิงที่ใช้อาจจะเป็นน้ำมันเตา ถ่านหิน หรือแก๊สก็ได้ เมื่อน้ำซีเมนต์ถูกส่งเข้าสู่เตาเผาทางด้านบนแล้วจะเคลื่อนสู่ส่วนล่างของเตาอย่างช้า ๆ ซึ่งสวนทางกับความร้อน ในระยะแรกน้ำในส่วนผสมจะถูกไล่ออก ต่อมาคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกไล่ออกไป และส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาทางเคมีไปเรื่อย ๆ จนถึงส่วนที่ร้อนที่สุดของเตา (sintering zone) อุณหภูมิประมาณ 1,000 – 1,500 องศาเซลเซียส ส่วนผสมจะจับกันเป็นก้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1/8 – 1 นิ้ว (0.3 – 2.5 เซนติเมตร) เรียกว่าเม็ดปูน (clinker) ซึ่งเม็ดปูนนี้จะค่อย ๆ เคลื่อนเข้าสู่ด้านล่างของเตาโดยผ่านการทำให้เย็นด้วยการใช้ ลมเป่า (cooler) จนกระทั่งมีอุณหภูมิประมาณ 65องศาเซลเซียส เม็ดปูนจะถูกนำเข้าบดผสมกับยิปซัม โดยใช้ยิปซัมประมาณร้อยละ 3–6 เพื่อเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาเคมี (retarder) ให้ซีเมนต์แข็งตัวช้าลงเพื่อสะดวกในการใช้งาน การบดปูนเม็ดกับแร่ยิปซัมจะใช้หม้อบด (ball mill หรือ cement mill) โดยผงปูนที่บดละเอียดแล้วจะถูกแยกโดยใช้เครื่องแยกขนาดด้วยลม (air separator) ส่วนที่เป็นเม็ดใหญ่หรือยังหยาบอยู่จะถูกส่งกลับไปยังหม้อบดอีกครั้ง ซีเมนต์ที่บดละเอียดแล้วจะมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 – 80 ไมโครเมตร (0.00039 – 0.00032 นิ้ว) โดยจะสามารถกรองผ่าน ตะแกรงขนาด 200 เมช แล้วจึงนำไปบรรจุในถุงกระดาษต่อไป [7]



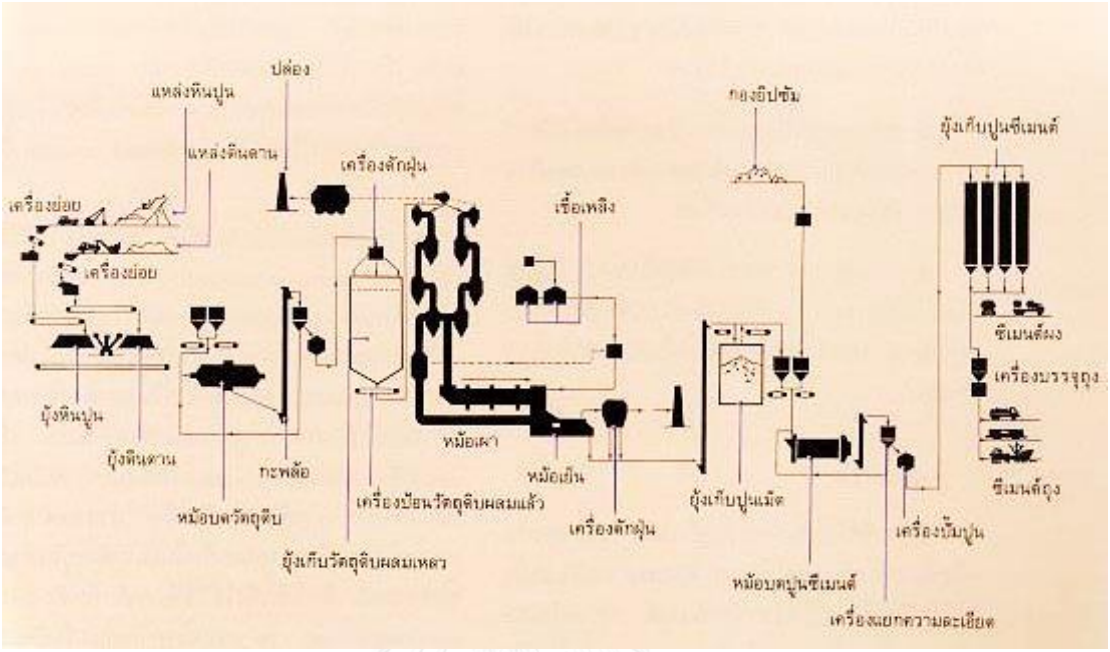
รูปที่ 1 แสดงกรรมวิธีการผลิตซีเมนต์แบบเปียก ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด โรงงานบางซื่อ กรงเทพฯและโรงงานท่าหลวง จังหวัดสระบุรี (ที่มา : สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง

การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้งไม่ต้องใช้น้ำในการผสมวัตถุดิบ ดังนั้นจึงประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยเฉพาะค่าเชื้อเพลิงและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ หินปูน (Limestone) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูน นำมาลดขนาดโดยเครื่องย่อย (Crusher) เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป ส่วนวัตถุดิบอื่น คือ ดินดาน (Shale) และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) สำหรับวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage Yard) จากนั้นจึงลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) ต่อไป

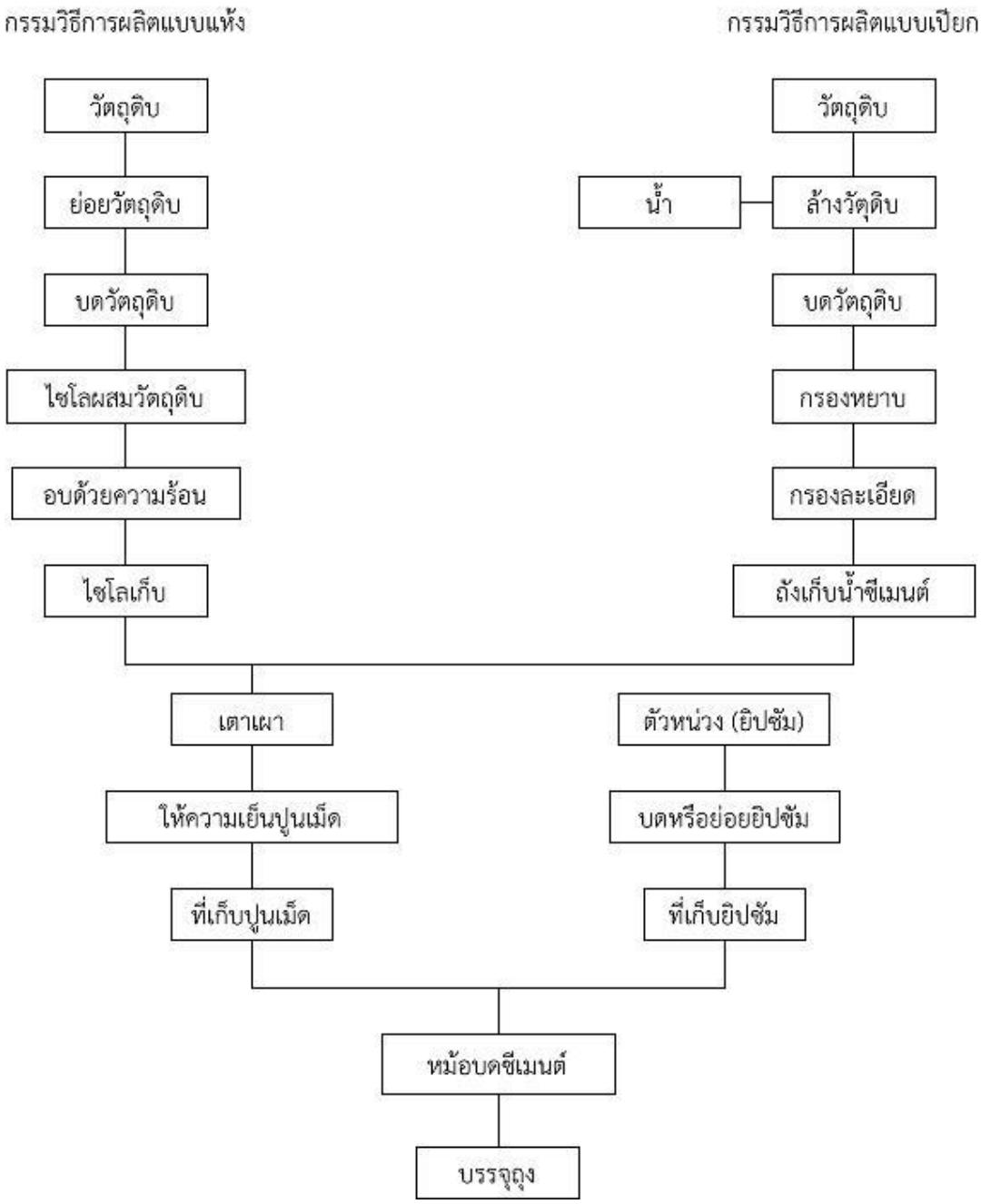
หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ว จึงส่งวัตถุดิบสำเร็จไปยังยุ้งผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal Homogenizing Silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนส่งไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) กระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) จะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ แล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 - 1,400 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) จากนั้นก็จะทำให้ปูนเม็ดเย็นลง แล้วจึงลำเลียงปูนเม็ดไปเก็บไว้ที่ยุ้งเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป เมื่อนำปูนเม็ดบดรวมกับยิบซั่มจะได้ปูนซีเมนต์ที่เรียกว่า ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland

Cement) และเมื่อนำปูนเม็ดมาบดรวมกับยิบซั่มและสารเฉื่อยอื่นๆ เช่น หินทราย ได้ปูนซีเมนต์ที่เรียกว่า ปูนผสม (Mixed Cement) [8],[9]



รูปที่ 2 แสดงกรรมวิธีการผลิตซีเมนต์แบบผสมแห้ง ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด โรงงานทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช (ที่มา : สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน)

ปัจจัยที่เป็นสิ่งกำหนดว่าโรงงานควรจะใช้กรรมวิธีการผลิตเปียกหรือกรรมวิธีการผลิต แห้ง ได้แก่ อัตราความชื้นในวัตถุดิบ ปริมาณน้ำ ต้นทุน ค่าเชื้อเพลิง พลังงาน ฝุ่น และการ- ขนส่งวัตถุดิบ เป็นต้น และโดยปกติกรรมวิธีการผลิตเปียกต้องใช้เชื้อเพลิงในการอบมากกว่า กรรมวิธีการผลิตแห้ง สำหรับกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยปัจจุบันนิยมผลิตแบบแห้งเนื่องจากกรรมวิธีการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อย



รูปที่ 3 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้งและแบบเปียก

(ที่มา : http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะเผาซีเมนต์

เมื่อส่วนผสมของปูนซีเมนต์ได้รับความร้อนในขณะเผาจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี 3 ช่วง ใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

1. ช่วงการระเหยของน้ำ

ความชื้นส่วนใหญ่จะถูกขับออกจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสเล็กน้อย ส่วนน้ำในโครงสร้างของดินจะระเหยออกไปที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป

2. ช่วงการแตกตัวของสารคาร์บอเนต (carbonate)

ได้แก่พวกหินปูน ($CaCO_3$) จะแตกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ส่วนพวกแมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate, $MgCO_3$) จะเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส

3. ช่วงการรวมตัวของหินปูนและสารประกอบอื่นกับซิลิกาและอะลูมินา

สารผสมของซีเมนต์จะทำปฏิกิริยารวมตัวกันที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 – 1,500 องศาเซลเซียส เป็นปูนเม็ด(Clinker) โดยต้องควบคุมให้ปูนเม็ดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,300 – 1,500 องศาเซลเซียส ประมาณ 20 นาที เพื่อไม่ให้เม็ดปูนเกิดการหลอมมากเกินไป ซึ่งจะควบคุมให้มีการหลอมเพียงร้อยละ 20 – 30 ในขณะเผาวัตถุดิบซึ่งเป็นส่วนผสมของซีเมนต์จะได้สารประกอบพื้นฐานของซีเมนต์ (cement compounds) จากสมการเคมีดังนี้

$$CaCO_3 \xrightarrow{900\ ^{o}C} CaO + CO_2$$

$$CaO \xrightarrow[Al_2O_3,\ SiO_2,\ Fe_2O_3]{1{,}000 - 1{,}200\ ^{o}C} C_2S + C_3A + C_4AF$$

$$C_2S + CaO \xrightarrow{1{,}200 - 1{,}400\ ^{o}C} C_3S$$

ปูนเม็ดที่ได้จากการเผาจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้สมบัติของสารประกอบ พื้นฐานทั้ง 4 มีความคงตัว ซึ่งสารประกอบหลักนี้ได้แก่

1. C_3S (tricalcium silicate หรือ alite หรือ $3CaO . SiO_2$) มีสมบัติคือให้แรงอัดหรือ ให้คอนกรีตมีกำลังในระยะแรก (early age) เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็วทำให้คอนกรีตเกิด ความแข็งแรงได้เร็วและความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป
2. C_2S (dicalcium silicate หรือ belite หรือ $2CaO . SiO_2$) มีสมบัติคือให้แรงอัดหรือให้คอนกรีตมีกำลังแข็งแรงขึ้นในระยะหลัง (later age) เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ช้ากว่า แต่มีปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอทำให้คอนกรีตเกิดความแข็งแรงได้เมื่อให้เวลาผ่านไปสักระยะ
3. C_3A (tricalcium aluminate หรือ celite หรือ $3CaO . Al_2O_3$) มีสมบัติคือเมื่อผสม กับน้ำเกิดการก่อตัวผิดปกติ (flash set) โดยสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็วแต่คอนกรีตที่ได้มี ความแข็งแรงต่ำ นอกจากนี้ C_3A สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำทะเลได้เพราะถูกกัดกร่อนได้โดย ซัลเฟต แต่ข้อดีคือช่วยเร่งอัตราการให้แรงอัดในระยะแรกของ C_3S
4. C_4AF (tetracalcium ferro aluminate หรือ felite หรือ $4CaO . Al_2O_3 . Fe_2O_3$) มีสมบัติคือทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเข้มและทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดีกว่า C_3A แต่มีความแข็งแรงน้อยมาก

นอกจากนี้การเผาซีเมนต์ยังเกิดหินปูนอิสระหรือไลม์อิสระ (free lime) คือแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาในการเผา ทั้งนี้เพราะมีแคลเซียมออกไซด์ในส่วนผสมมากเกินไป หรือแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยาไม่หมดเนื่องจากการเผาไม่สมบูรณ์ ซึ่งในปูนเม็ดปกติจะมี หินปูนอิสระประมาณร้อยละ 1.0

ตัวอย่างสารประกอบทางเคมีของปูนเม็ด

SiO_2	ร้อยละ 22.00	SO_3	ร้อยละ 0.41
Al_2O_3	ร้อยละ 5.30	C_3S	ร้อยละ 65.35
Fe_2O_3	ร้อยละ 3.00	C_2S	ร้อยละ 17.64
CaO	ร้อยละ 66.00	C_3A	ร้อยละ 8.97
MgO	ร้อยละ 0.90	C_4AF	ร้อยละ 9.12

ปูนเม็ดที่ได้จะถูกส่งผ่านเข้าไปผสมกับยิปซัมและปูนขาวที่หม้อบด หน้าที่ของยิปซัมและปูนขาวคือหน่วงปฏิกิริยาซีเมนเตชัน (cementation) ขณะนำปูนซีเมนต์ไปขึ้นรูปและลดต้นทุนการผลิต โดยปูนเม็ดแต่ละชนิดจะมีส่วนผสมของปูนเม็ดและยิปซัมต่างกันดังเช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาจะมีอัตราส่วนการผสมระหว่าง ปูนเม็ด : ยิปซัม ประมาณ 95 : 5 ความละเอียดประมาณ 3,300 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (cm^2 /g) ส่วนปูนซีเมนต์ผสมจะมี อัตราส่วนผสมระหว่าง ปูนเม็ด :

หินปูน : ยิปซัม ประมาณ 69.5 : 27.5 : 3.0 ความละเอียด ประมาณ 3,800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดแรงสูงเร็วจะมีอัตราส่วนการผสมระหว่าง ปูนเม็ด : ยิปซัม ประมาณ 94 : 6 ความละเอียดประมาณ 4,700 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งหากเติมยิปซัมน้อยเกินไปจะเกิดการก่อตัวผิดปกติแต่ถ้ามากเกินไปจะ เกิดการขยายตัวเมื่อใช้งาน และการเติมยิปซัมในอัตราส่วนที่พอเหมาะจะช่วยควบคุมการก่อตัวได้นอกจากนี้จะช่วยให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น

การที่จะพิจารณาได้ว่ากรรมวิธีการเผาเป็นไปอย่างถูกต้องหรือไม่ ให้พิจารณาจากสีและรูปร่างของเม็ดปูน กล่าวคือถ้าเผาได้ถูกต้องเม็ดปูนจะมีสีดำปนเขียว เมื่อเย็นตัวจะมี ลักษณะมันแววาวเป็นจุด ๆ เม็ดปูนก้อนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 นิ้ว (2.5 เซนติเมตร) หากเป็นเม็ดปูนที่ยังเผาไม่ได้ที่จะมีสีน้ำตาลหรือมีสีน้ำตาลเป็นหย่อม ๆ ไม่เป็น มันเหมือนที่เผาได้ที่แล้ว ส่วนปูนเม็ดที่เผาเกินพอดีจะมีสีน้ำตาลเช่นกันแต่แข็งมาก การเผาเกินพอดีนอกจากจะทำให้ได้ปูนเม็ดที่มีสัดส่วนของหินปูนต่ำแล้วยังก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดมากขึ้น เพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอดีจะมีความแข็งมากยากแก่การบด [7]

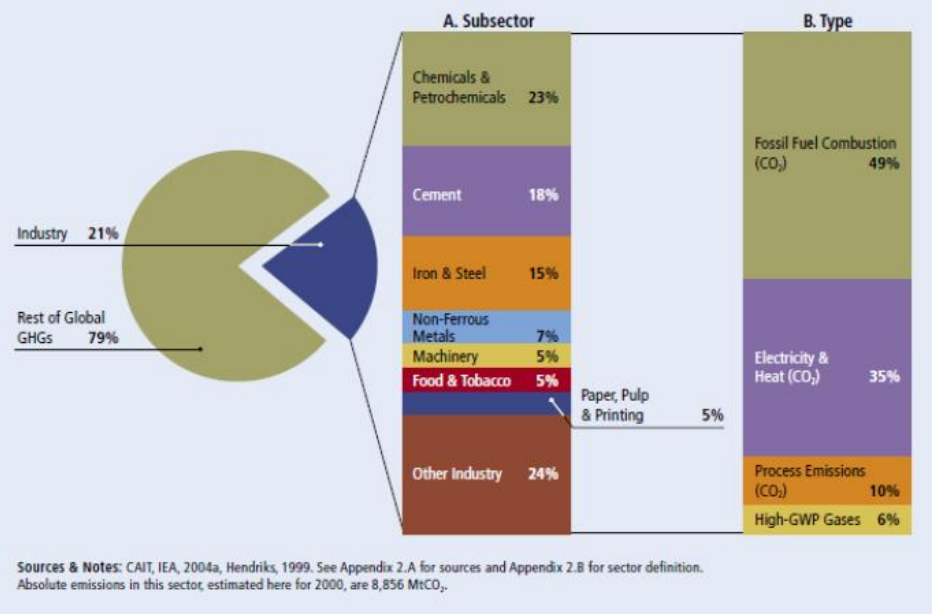
ประเทศไทยมีพื้นที่ในผลิตปูนซีเมนต์หลักๆ 5 จุดกระจายในพื้นที่ดังต่อไปนี้ จังหวัดลำปาง จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดสระบุรี จังหวัดเพชรบุรี และจังหวัดนครศรีธรรมราช ดังรูป

รูปที่ 4 แผนที่แสดงบริเวณพื้นที่ที่มีการผลิตปูนซีเมนต์

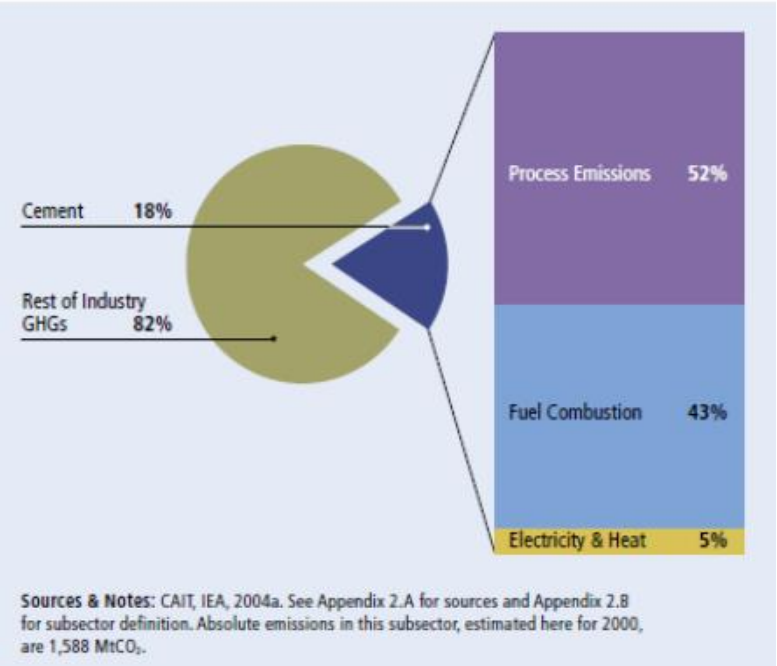
(ที่มา : สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย)

2.2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

ในปี ค.ศ. 2000 ได้มีการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคอุตสาหกรรมของโลกและจากประเทศต่างๆ ตามคู่มือของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) พบว่า ภาคอุตสาหกรรมมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงถึงร้อยละ 21 ของภาคการผลิตทั้งหมด อุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือน กระจกสูงเป็น 5 อันดับแรก ได้แก่ อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี(ร้อยละ 23), อุตสาหกรรมซีเมนต์(ร้อยละ 18), อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า (ร้อยละ 15), อุตสาหกรรมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (ร้อยละ 7) และอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักร (ร้อยละ 5) ดังรูปที่ 5 และจากการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉพาะภาคส่วนอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ สามารถแบ่งสัดส่วนปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ จากกระบวนการผลิต 52% จากการเผาไหม้ 43% และจากการใช้ความร้อนและไฟฟ้า 5% [1] ดังรูปที่ 6 ในขั้นตอนการเผาไหม้และกระบวนการผลิตนั้นส่วนหนึ่งคือเพื่อให้ได้มาซึ่งปูนเม็ด หากสามารถลดลงปริมาณปูนเม็ดที่ใช้ได้ ปูนเม็ดที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ก็จะมีปริมาณน้อยลง ส่งผลให้ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาน้อยลงไปด้วย



รูปที่ 5 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคอุตสาหกรรม
(ที่มา : โครงการการพัฒนาวิธีการประเมินความรับผิดชอบร่วมในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรม ระหว่างประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา)



รูปที่ 6 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์
(ที่มา : โครงการการพัฒนาวิธีการประเมินความรับผิดชอบร่วมในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรม ระหว่างประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา)

2.3 แนวคิดการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

จากรายงานขององค์การพลังงานระหว่างประเทศ หรือ International Energy Agency (IEA) พบว่าอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ทั่วโลกมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงประมาณ 5% และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาจำนวนมาก IEA จึงได้ร่วมกับสภานักธุรกิจโลกเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน กลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ หรือ World Business Council for Sustainable Development's Cement Sustainability Initiative (WBCSD CSI) ออกมาตรการและแนวทางในการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกโดยมีเป้าหมายและทิศทางในการดำเนินการอย่างชัดเจนในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เรียกว่า Cement Technology Roadmap 2009 Carbon Emission Reductions up to 2050 เพื่อให้เป็นแนวทางในการดำเนินการของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และสอดคล้องกับทิศทางของอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศ หรือ The United Nations Framework Convention on Climate Change(UNFCCC) ที่มีจุดมุ่งหมายหลักในการตั้งเป้าลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ 2 องศาเซลเซียส หรือ Blue Scenario

เพื่อลดผลกระทบที่ตามมาในอนาคต โดยได้นำเสนอเทคโนโลยีที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาดังนี้ [2]

1. ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนและไฟฟ้า
2. การใช้พลังงานทดแทน
3. การใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ด
4. การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

โดยพื้นฐานของประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมดังนั้นเทคโนโลยีการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดจึงมีความเหมาะสมอย่างมาก วัสดุทดแทนปูนเม็ดที่น่าสนใจและมีงานวิจัยรับรองว่ามีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดได้ตามปริมาณที่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น เถ้าลอยถ่านจากการเผาถ่านหิน เถ้าชีวมวลเช่น เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการนำขยะของเหลือทางการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

จากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2558-2579 (PDP2015) ซึ่งกำหนดให้มีโรงไฟฟ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่มากขึ้น [4] ทำให้เถ้าที่เป็นผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย อีกทั้งข้อมูลจากรายงานแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (AEDP2015) แนวโน้มพื้นที่การปลูกของอ้อยและปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นรวมถึงการคาดการณ์การนำอ้อยและปาล์มน้ำมันไปตามนโยบายของรัฐที่สนับสนุนให้ใช้พลังงานทดแทนจากไบโอดีเซลและเอทานอล [5] เห็นได้ชัดว่าเถ้าทั้งสามชนิดมีศักยภาพและปริมาณที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของไทยได้

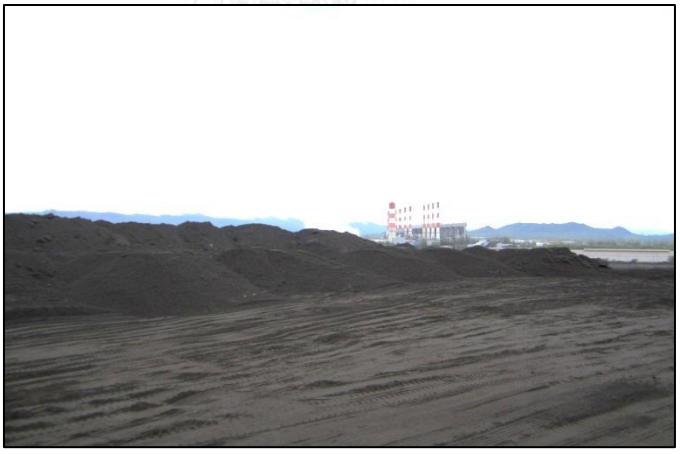
2.4 ศักยภาพและคุณสมบัติของเถ้าที่สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการใช้งานในโรงงานหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า แม้ว่าเถ้าบางชนิดจะมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นหรือการกำจัดโดยการนำไปถมที่หรือทิ้งในบ่อทิ้งที่มีการขุดเตรียมไว้ แต่ด้วยปริมาณของเถ้าที่มีจำนวนมากส่งผลให้เรื่องการกำจัดทิ้งยังคงเป็นปัญหาอยู่

จากข้อมูลของงานวิจัยในประเทศไทย พบว่าเถ้าที่สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้จะต้องมีลักษณะดังนี้ คือ มีซิลิกาหรือออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ในปริมาณสูงซึ่งควรมากกว่าร้อยละ 50 ของทั้งหมด มีความละเอียดสูงหรือสามารถทำให้มีความละเอียดสูงได้และไม่เป็นผลึกคือ

สามารถทำปฏิกิริยากับด่าง หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ ซึ่งเถ้าที่มีคุณสมบัติตามลักษณะข้างต้น ได้แก่ เถ้าลอย[1] ที่ได้จากการเผาถ่านหิน เถ้าชานอ้อย[2] ที่ได้จากหารใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เถ้าปาล์มน้ำมัน[3] ที่ได้จากการใช้กากปาล์มหรือทลายปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จากข้อมูลของวารสารคอนกรีต ฉบับประจำเดือนธันวาคม พ.ศ. 2558 พบว่าปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นรวมกันปีละประมาณ 5.4 ล้านตัน โดยเป็นเถ้าถ่านหินประมาณ 3.5 ล้านตันและเถ้าอื่นๆ อีกประมาณ 1.9 ล้านตัน แต่มีการนำเถ้าเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ประมาณ 1.8 ล้านตันหรือประมาณร้อยละ 33 ของปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี เถ้าส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมดที่นำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นเถ้าจากถ่านหินเท่านั้น ส่วนเถ้าอื่นๆที่มีอยู่เกือบทั้งหมดรวมทั้งเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ต้องนำไปทิ้ง[10]

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash or Pulverized fuel ash) เป็นเถ้าที่เกิดจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า แหล่งเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณมากที่สุดในประเทศไทยอยู่ที่โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีกำลังการผลิตประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ถึงแม้จะมีการนำไปใช้งาน แต่เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่คือประมาณ 1.7-2.0 ล้านตันต่อปียังต้องนำไปทิ้ง



รูปที่ 7 บริเวณบ่อทิ้งเถ้าถ่านหินแม่เมาะ
(ที่มา : เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม วัสดุปอซโซลานที่ดีสำหรับงานคอนกรีต)

[1] เถ้าลอยหรือเถ้าลอยถ่านหิน (Fly ash or Pulverized fuel ash) เป็นเถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ชื่อย่อว่า เถ้าลอย

[2] เถ้าชานอ้อยหรือเถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse ash or Bagasse fly ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ชื่อย่อว่า เถ้าชานอ้อย

[3] เถ้าปาล์มน้ำมันหรือเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash or palm oil fuel fly ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการใช้กากปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ชื่อย่อว่า เถ้าปาล์มน้ำมัน

นอกจากนี้ ในปี พ.ศ. 2545 ยังได้มีการออกมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ Thai Industrial Standards(TIS) มอก.2135 เพื่อเป็นหลักในการนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานคอนกรีตได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash or Bagasse fly ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการนำชานอ้อยที่เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำผลิตน้ำตาล มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นประเทศอันดับต้นๆ ของโลกที่มีการปลูกอ้อยจำนวนมาก โดยอยู่ที่อันดับ 3 รองจากประเทศบราซิล และ อินเดีย เมื่อนำชานอ้อยไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วจะเหลือเป็นเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย หรือประมาณ 6 แสนตันต่อปี และในปัจจุบันยังไม่มีแนวทางในการจัดการให้เกิดประโยชน์ได้อย่างแท้จริง อีกทั้งการดำเนินการเพื่อนำเถ้าชานอ้อยไปใช้ประโยชน์ก็มิใช่เรื่องง่ายนักปัญหาจึงเกิดขึ้นกับโรงงานผลิตน้ำตาลในการกำจัดเถ้าชานอ้อย ทั้งขนไปทิ้ง จัดพื้นที่กองเถ้าหรือพื้นที่ฝังกลบ นอกจากนี้เถ้าชานอ้อยยังก่อให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมกับบริเวณโดยรอบอีกด้วย

รูปที่ 8 กองเถ้าชานอ้อยก่อนเผา และบ่อทิ้งเถ้าชานอ้อย
(ที่มา : เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม วัสดุปอซโซลานที่ดีสำหรับงานคอนกรีต)

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash or palm oil fuel fly ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผากากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์มเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2556 - 2557 พบว่าพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยเพิ่มขึ้นเป็น 4.4 ล้านไร่ มีผลผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าเป็น 12.37 ล้านตันต่อปี และกลายเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ลำดับที่ 3 ของโลก ส่งผลให้มีเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 300,000 ตันต่อปี เถ้าปาล์มน้ำมันมีการใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้งเช่นเดียวกับเถ้าชานอ้อย อีกทั้งนโยบายของรัฐบาลไทยที่สนับสนุนให้มีการนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในรถยนต์ เช่น เป็นไบโอดีเซล ทำให้มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย [3]

รูปที่ 9 กากปาล์มน้ำมันก่อนการเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิง และ เถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากการเผา (ที่มา : เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม วัสดุปอซโซลานที่ดีสำหรับงานคอนกรีต)

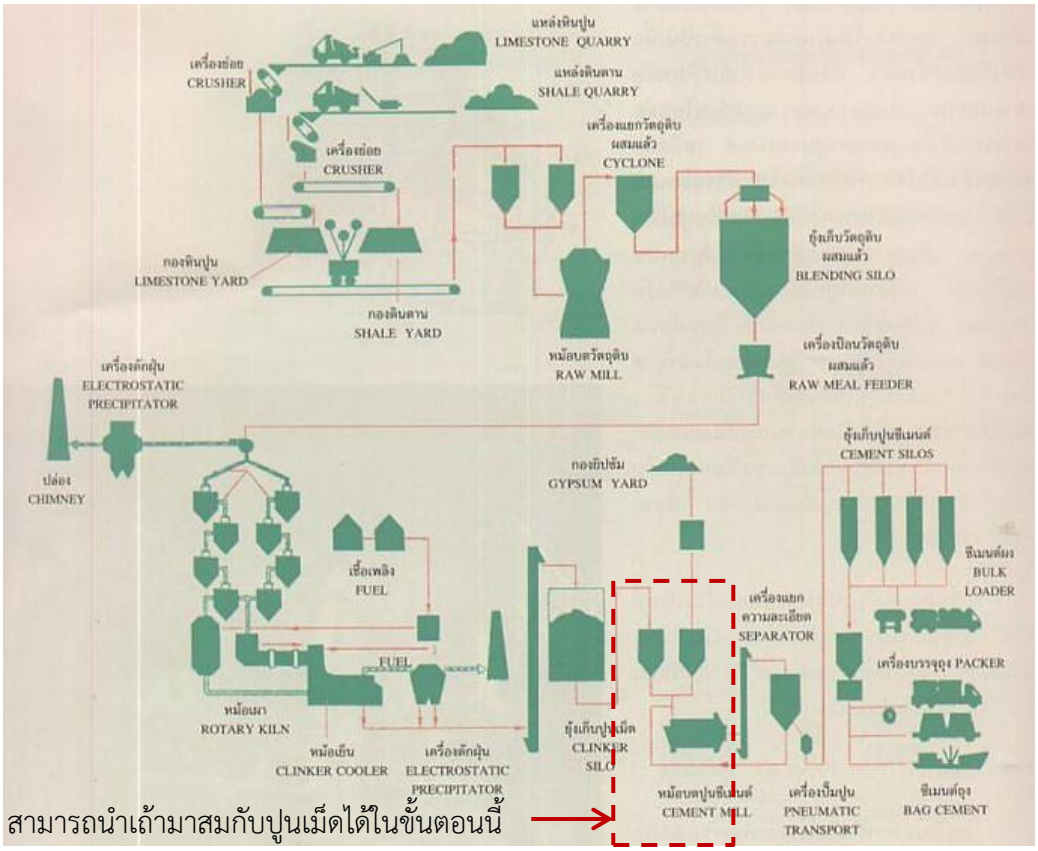
ในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการวิเคราะห์หาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย โดยเถ้าที่นำมาใช้วิเคราะห์ ประกอบไปด้วยเถ้าลอยและเถ้าชีวมวลที่ยังไม่มีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทำให้มีปัญหาในการกำจัดทิ้งซึ่งก็คือ เถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมัน เพราะนอกจากจะเป็นการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์แล้วนั้น ยังเป็นวิธีการกำจัดเถ้าที่เป็นขยะเหลือทิ้งอีกด้วย

2.5 ขั้นตอนการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

วัสดุทดแทนปูนเม็ดที่มีศักยภาพสำหรับการนำไปใช้ทดแทนปูนเม็ดทั้งสามชนิด คือ เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน การนำเถ้าทั้งสามชนิดนี้ไปใช้จะต้องผ่านกระบวนการการบดเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสำหรับการเป็นวัสดุปอซโซลาน ยิ่งเถ้ามีความละเอียดมากเท่าใดก็จะยิ่งส่งผลให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีเท่านั้น เพราะเมื่อมีความละเอียดมากย่อมมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากและส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังและคุณภาพสูงขึ้นกว่าการใช้เถ้าที่มีความละเอียดต่ำกกว่า

จากงานวิจัยพบว่าเถ้าลอยที่ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าถ่านหินที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นแหล่งเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุด เป็นเถ้าที่ผ่านการเผาไหม้สมบูรณ์ เถ้าที่ได้จึงมีขนาดเล็ก ลักษณะรูปร่างทรงกลมและมีผิวเรียบ สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้โดยไม่ต้องผ่านการบดซ้ำ แต่สำหรับเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันต้องผ่านการบดซ้ำ เพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการก่อนนำไปใช้ [3]

ในเบื้องต้นคาดว่าการจะนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น จะต้องผ่านการบดเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งอาจมีความจำเป็นจะต้องติดตั้งเครื่องจักรที่ใช้ทำการบดเถ้าขึ้นมาใหม่ ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการลงทุน แต่ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับกระบวนการบดเถ้าที่นำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น สามารถนำไปเถ้าไปผสมกับปูเม็ดก่อนขั้นตอนการบดได้เลย ไม่จำเป็นต้องมีการลงทุนติดตั้งเครื่องจักรใหม่เพื่อใช้สำหรับการบดเถ้า การใช้วิธีการใหม่ในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่มีการลงทุนเพิ่มนั้น ถือเป็นผลดีที่เกิดขึ้นกับโรงงานปูนซีเมนต์

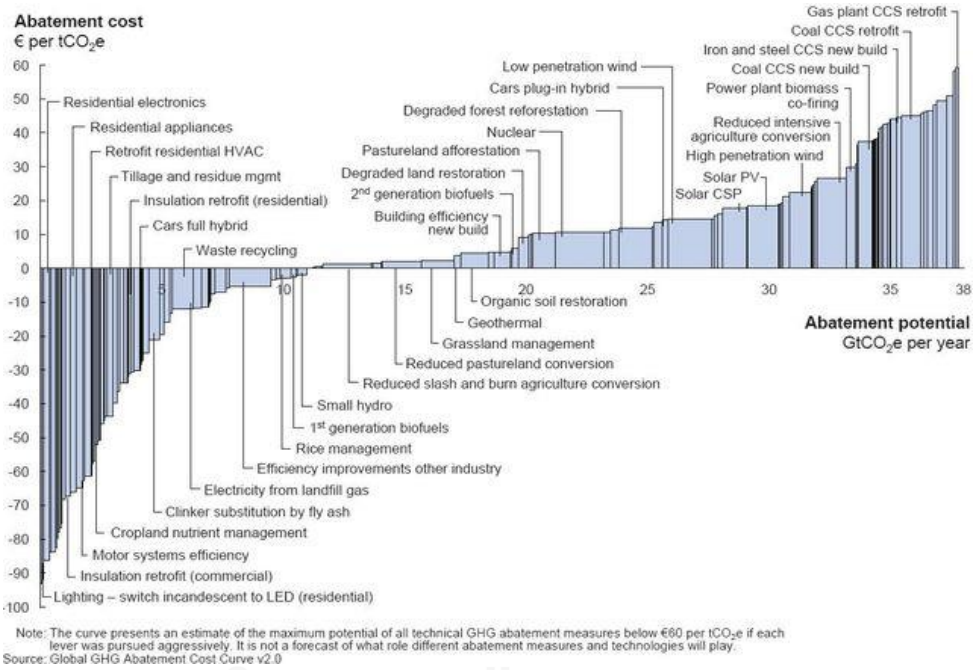


รูปที่ 10 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง
(ที่มา : สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ)

2.6 แนวคิดการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การวิเคราะห์หาต้นทุนของการลดการการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ไม่เพียงแต่เป็นการแสดงให้เห็นถึงต้นทุนของแนวทางดังกล่าว แต่ยังเป็นการสนับสนุนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงภาระที่จะเกิดกับผู้ประกอบการว่ามีมากน้อยเพียงใด และแนวทางดังกล่าวมีความคุ้มค่าที่จะลงทุนหรือไม่

โดยจะนำเสนออยู่ในรูปแบบเส้นกราฟแสดงการประมาณต้นทุนของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางนั้นๆ โดยในแกน Y จะแสดงถึงปริมาณต้นทุนที่ใช้ในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละมาตรการ และความกว้างของแถบแต่ละแถบในแนวแกน X แสดงถึงศักยภาพของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมาตรการนั้นๆ โดยมาตรการที่อยู่ทางด้านซ้ายและอยู่ใต้แกน X จะเป็นมาตรการที่มีต้นทุนต่ำกว่ามาตรการที่อยู่ด้านขวาและอยู่เหนือแกน X ดังรูปที่ 4 ข้อดีของการนำเสนอในรูปแบบนี้คือ มีความชัดเจนและง่ายต่อการทำความเข้าใจสำหรับผู้ที่สนใจ



Chulalongkorn University

รูปที่ 11 แสดงเส้นต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลก เวอร์ชั่น 2

(ที่มา : McKinsey & Company,Pathways to a Low-Carbon Economy, 2009.)

ข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณต้นทุนในงานวิจัยครั้งนี้คือข้อมูลเฉลี่ยของปีฐาน(พ.ศ.2558) และการประมาณการณ์ราคาในอนาคตอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่มีในอดีตและปัจจุบัน ในส่วนของต้นทุนที่เกี่ยวกับการทำธุรกรรม หรือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทำการแลกเปลี่ยนกันทางเศรษฐกิจ เช่น การศึกษา การรักษา เป็นต้น รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถือเป็นส่วนหนึ่งในการทำธุรกรรม เช่น การรณรงค์เพื่อให้ข้อมูล และการฝึกอบรมในทางเทคนิคแล้วอยู่นอกเหนือไปจากการนำมาวิเคราะห์หาต้นทุนของมาตรการ ซึ่งไม่ได้ถูกนำมารวมในเส้นกราฟต้นทุนต่อหน่วยของแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [11]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Hasanbeigi, Menke และ Price (2010:1509-1518) [12] ศึกษาเส้นต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย เป็นการศึกษาในรูปแบบของ Bottom up approach เป็นการคำนึงถึงค่าใช้จ่ายและศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน ซึ่งระยะเวลาทำการศึกษาทั้งหมด 15 ปี (ค.ศ. 2010 – 2025) โดยได้ทำการวิเคราะห์เทคโนโลยีและมาตรการการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 41 ประเภท สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งเริ่มตั้งแต่ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมเชื้อเพลิง การเตรียมวัตถุดิบ การผลิตปูนเม็ด ตลอดไปจนถึงการใช้เชื้อเพลิงทดแทน การบดเสร็จและการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมซีเมนต์ของไทยตลอดช่วงที่ทำการศึกษามีค่าเท่ากับ 3,095 ktonCO_2/year หรือประมาณ 15% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมของอุตสาหกรรมปูซีเมนต์ของไทยในปี ค.ศ. 2005 และมีอัตราคิดลดเท่ากับ 10% ในทางเทคนิคโดยรวมศักยภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีคือ 3,143 ktonCO_2/year ซึ่งคิดเป็นประมาณ 15.2% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมของอุตสาหกรรมปูซีเมนต์ของไทยในปี ค.ศ. 2005 และยังได้ดำเนินการวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อพารามิเตอร์ในส่วนของอัตราคิดลด ยิ่งอัตราคิดลดเพิ่มขึ้นจะยิ่งทำให้ต้นทุนต่ำลง โดยในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องฉบับนี้แม้จะเป็นการศึกษาในประเทศไทย แต่ไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

2. Kiuila และ Rutherford (2013:62-71) [13] ศึกษาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์การบูรณาการการใช้เทคโนโลยีการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์ ทำการสำรวจวิธีการลดต้นทุนโดยใช้รูปแบบ Bottom up Approach ไปสู่รูปแบบ Top down Approach ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ 1. Economy – wide และ 2. Sector specific ของประเทศสวิตเซอร์แลนด์จากการประเมินด้วยวิธี Top down Approach แสดงให้เห็นถึงต้นทุนของนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมที่สูงมาก หากไม่รวมการวิเคราะห์เส้นต้นทุนการลดแบบ Bottom up Approach ลงไปด้วย ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า นโยบายทางสภาพอากาศในปัจจุบันนั้นที่ซึ่งต้องการลดประมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลง 10 % ยังไม่สามารถเดินหน้าต่อได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องฉบับนี้ไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด มีเพียงการนำเสนอในรูปแบบกราฟแสดงเส้นต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3. Hasanbeigi, Menke และ Therdyothin (2010:392-405) [14] ศึกษาการใช้เส้นโค้งอุปทานการอนุรักษ์พลังงานในนโยบายพลังงานและการวิเคราะห์เศรษฐกิจ กรณีศึกษาอุตสาหกรรม

ซีเมนต์ของประเทศไทย การใช้รูปแบบวิธีเส้นโค้งการอนุรักษ์แหล่งพลังงานไฟฟ้าแบบ Bottom up Approach (Conservation Supply Curve : CSC) ต้นทุนประสิทธิผลและศักยภาพทางเทคนิคของการผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทยในปี 2008 คาดว่าจะอยู่ที่ประมาณ 265 และ 1697 กิกะวัตต์ชั่วโมง (GWh) ซึ่งคิดเป็น 8% และ 51% ของทั้งหมด ของไฟฟ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในปี 2005 ตามลำดับ โดยรูปแบบเส้นโค้งการอนุรักษ์แหล่งเชื้อเพลิงจะแสดงให้เห็นถึงต้นทุนประสิทธิผลและศักยภาพของการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ คือ 17,214 เตระจูล (Tj) ศักยภาพทางเทคนิคของการผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 21,202 Tj คิดเป็น 16% และ 19% ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในปี 2005 ตามลำดับ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลจาก CSCs สามารถนำมาใช้ในการคำนวณมูลค่าปัจจุบัน (Present Value : PV) ของมูลค่าการประหยัดค่าใช้จ่ายสุทธิในรอบระยะเวลาที่มีใช้ในบัญชีอัตราการเพิ่มขึ้นของราคาพลังงาน ผลจากการวิเคราะห์นโยบายโครงการแสดงให้เห็นว่านโยบายโครงการมีประสิทธิผลและประสิทธิภาพ คือมีการแนะนำเกี่ยวกับภาษีคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ภายใต้โครงการข้อตกลงโดยสมัครใจ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นผลลัพธ์จากการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานระดับปฐมภูมิมากกว่า 5 ปีที่มีการดำเนินการในช่วงเวลาเดียวกันที่ 16.90% งานวิจัยที่เกี่ยวข้องฉบับนี้แม้จะเป็นการศึกษาในประเทศไทย แต่จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนและไฟฟ้านำเสนอในรูปแบบกราฟแสดงเส้นต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

4. Brunke และ Blesl (2014:94-111) [15] ศึกษามาตรการอนุรักษ์พลังงานสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศเยอรมันและความสารถในการชดเชยต้นทุนการลิตของพลังงานที่เพิ่มขึ้น ทำการประเมินศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานจาก 21 มาตรการโดยมากจากเชื้อเพลิง การอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าและเส้นโค้งต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการตรวจสอบโดยใช้รูปแบบจากล่างขึ้นบน (Bottom up Approach) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ขั้นตอนคือ การประเมินประสิทธิภาพของแต่ละมาตรการในส่วนของการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงค่าใช้จ่ายในกระบวนการ และการประเมินความคุ้มค่าของการอนุรักษ์พลังงานและศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของภาคส่วนทั้งหมด และยังได้พิจารณาถึงประสิทธิภาพในปัจจุบันของโรงงานและความแตกต่างของระบบ ได้ระบุความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และศักยภาพการลดสำหรับปี 2013 อยู่ที่ 4% ของเชื้อเพลิง 0.7% สำหรับพลังงานไฟฟ้า และ 3.4% สำหรับพลังงานและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวแสดงให้เห็นว่ามาตรการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์สามารถชดเชยราคาค่า

ไฟฟ้าที่สูงขึ้นในปริมาณภาษีค่าไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน ในทางตรงกันข้ามส่วนของต้นทุนการผลิตที่มีความเกี่ยวข้องกับพลังงาน พบว่ามีความอ่อนไหวสูงกับราคาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น หากไม่มีนวัตกรรมปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ ราคาคาร์บอนไดออกไซด์ของซีเมนต์จนถึงปีค.ศ. 2035 คิดเป็นสัดส่วนเฉลี่ย 40% ของกำไรขั้นต้นที่เพิ่มขึ้นตามที่ตลาดคาร์บอนเครดิตในสหภาพยุโรป (European Union Emission Trading Scheme: EU ETS) ได้ระบุไว้ ซึ่งบ่งชี้ความเสี่ยงการรั่วไหลคาร์บอนภาคซีเมนต์ งานวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นถึงต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไซด์จากการดำเนินเทคโนโลยีและแนวต่างๆ รวมถึงการใช้เถ้าลอยในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งแนวทางที่มีต้นทุนต่ำ แต่จะเป็นการศึกษาในประเทศเยอรมัน

5. Xi, Fei และ Gehua (2013:102-111) [16] ศึกษาศักยภาพที่มีผลประโยชน์ร่วมกันของภาคอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศจีนแผนระยะเวลา 5 ปี ทำการวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานของต้นทุนการลดหย่อนกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การเจริญเติบโตของประเทศจีนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการควบคุมการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อที่จะควบคุมให้ปริมาณคาร์บอนน้อยลง ดังนั้นจำเป็นต้องร่วมมือกันทำ co-benefits เพื่อบรรเทาปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและต้องใช้เงินงบประมาณที่สูง แต่ในประเทศจีนไม่ได้รับการสนับสนุนเชิงนโยบายเท่าที่ควร จาก 18 ตัวอย่างเทคโนโลยีที่ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งมีสำเหตุจากการเติบโตของธุรกิจซีเมนต์ช่วงของ co-benefits แปรผันอยู่ระหว่าง 3RMB/tCO2 – 267RMB/tCO2 ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ ประสิทธิภาพของ co-benefits ในส่วนของธุรกิจซีเมนต์นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี co-control จากมุมมองทางด้านการลดมลภาวะนั้น มีเทคโนโลยีอยู่ที่ 4 เทคโนโลยีที่สามารถลดมลภาวะได้ดี คือ CSS,การทดสอบออนไลน์ การวิเคราะห์ของระบบการจัดการพลังงาน พลังงานทางเลือกและเทคโนโลยีการสูญเสียความร้อนที่อุณหภูมิต่ำเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนด้านต้นทุนคือ การเพิ่มประสิทธิภาพการทำเหมือง ส่วนเทคโนโลยีอื่นๆที่สามารถลดต้นทุนได้ดีก็มี รอกเทปเหล็กใหม่, โรงบดแนวตั้งเพื่อใช้สำหรับการบดวัตถุดิบ, และ เทคโนโลยีการสูญเสียความร้อนที่อุณหภูมิต่ำเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า งานวิจัยนี้ยังชี้ให้เห็นถึง การใช้เทคโนโลยีที่ช่วยลดต้นทุนและการใช้ประโยชน์ร่วมกันด้านสิ่งแวดล้อมประมาณ จะทำให้เกิดประโยชน์กับบริษัทซีเมนต์มากกว่าที่ทางบริษัทจะจัดการเองและยังทำให้ผู้ประกอบการเกิดแรงจูงใจในการวางแผนการรับผิดชอบต่อสภาพแวดล้อมและสังคมเมือง งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาในประเทศจีน เป็นการศึกษาถึงต้นทุนการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้เทคโนโลยีต่างๆ แต่ไม่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

6. อดิศร์ อิศรางกูร ณ อยุธยา และคณะ (2010) [17] โดยการศึกษาทำการวิเคราะห์ต้นทุนในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีลักษณะข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) โดยใช้ ตัวอย่างการคำนวณต้นทุนในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผู้ประกอบการภายใต้โครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาด (Clean Development Mechanism: CDM) ผลของการศึกษาพบว่าต้นทุนในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคการผลิตต่างๆ สำหรับ โครงการ CDM มีช่วงความแตกต่างที่ค่อนข้างกว้าง ตั้งแต่ 16 บาท/หน่วย จนถึง 27,343 บาท/หน่วย แสดงให้เห็นว่าการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละสาขาการผลิตนั้น มีต้นทุนในการลดที่แตกต่างกัน โดยต้นทุนในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยสูงที่สุดคือภาคพลังงานที่ผลิตไฟฟ้า รองลงมาคือ ภาคอุตสาหกรรม และภาคพลังงาน (เกษตร) ภาคพลังงาน (อุตสาหกรรม) และภาคของเสียและสิ่งปฏิกูล ดังนั้น แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับประเทศไทยคือการส่งเสริม การดำเนินการโครงการ CDM ที่มีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคพลังงาน (อุตสาหกรรม) และ ภาคของเสียและสิ่งปฏิกูล งานวิจัยที่เกี่ยวข้องฉบับนี้เป็นการศึกษาต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยแบ่งออกเป็นภาคส่วนอุตสาหกรรม แต่ไม่ได้มีการศึกษาเฉพาะไปยังอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

7. Mckinsey & Company (2009:76-77) [18] จากรายงานของบริษัท Mckinsey & Company[4] ซึ่งได้ระบุ 8 มาตรการในการลดก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มด้วยกัน ดังนี้

1.) เพิ่มการใช้วัสดุทดแทนเม็ดปูนโดยวัสดุที่มีส่วนประกอบแร่ปูนซีเมนต์
(50% ของศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกหรือประมาณ 490 $MtCO_2e$/year)

วัสดุทดแทนเม็ดปูนเช่น ตระกรันจากเตาหลอม, เถ้าลอย และส่วนประกอบแร่ธาตุอื่นๆที่ช่วยลดมลพิษจากผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ทุกชนิด รวมถึงขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษทางอ้อม เปรียบเทียบกับปริมาณเม็ดปูนกรณีที่มีการดำเนินการตามปกติประมาณ 82% ในปี 2030 และการลดปริมาณเม็ดปูนอยู่ที่ประมาณ 70% ทั่วโลก สำหรับการเพิ่มวัสดุทดแทนเม็ดปูนต้องคำนึงถึงความพร้อมในระดับภูมิภาคของแร่ที่เป็นองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับอุตสาหกรรมเหล็กและภาคพลังงาน โครงการการลดก๊าซเรือนกระจก ตระกรันจากอุตสาหกรรมเหล็กจะถูกทำให้กลายเป็นเมล็ดและเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินจะถูกทำให้แห้ง เราจึงพิจารณาถึงความแตกต่างของศักยภาพวัสดุทดแทนเม็ดปูนของแร่ที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (เช่น K-factor ของตระกรัน, เถ้าลอยและอื่นๆ)

[4] แมคคินซีย์แอนด์คอมปะนี)McKinsey & Company) เป็นบริษัทที่ปรึกษาด้านการบริหารชั้นนำของโลก ทั้งในด้านกลยุทธ์ การบริหารองค์กรโดยรวม นโยบาย การจัดการต้นทุนและผลกำไร การวิจัยและพัฒนา รวมถึงระบบข้อมูลด้านการบริหาร

2.) การเพิ่มสัดส่วนของเชื้อเพลิงทดแทนในเชื้อเพลิงผสม

(27% ของศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกหรือประมาณ 260 $MtCO_2e$/year)

แทนที่เชื้อเพลิงฟอสซิลโดยเชื้อเพลิงทดแทนเช่นขยะของชุมชนหรือขยะอุตสาหกรรมและชีวมวลในเตาเผาปูนซีเมนต์จะช่วยลดการปล่อยมลพิษจากขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงจากขั้นตอนการผลิตเม็ดปูน ในการประเมินศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกอนุมานว่า (1) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากชีวมวลคือสภาพอากาศที่เป็นกลาง (2) การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แท้จริงอยู่ที่ทางเลือกของกระบวนการกำจัดขยะของภาคซีเมนต์ และ(3) ขยะและชีวมวลที่มีอยู่ในท้องถิ่นเพียงพอที่ใช้เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในอัตราพลังงานทดแทนที่ 33% ของทั้งหมด (25% จากขยะ และ 8% จากชีวมวล) เปรียบเทียบกับน้อยกว่า 5% กรณีที่การดำเนินการตามปกติของทั่วโลก

3.) การจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture storage : CCS)

(22% ของศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกหรือประมาณ 210 $MtCO_2e$/year ในแง่สุทธิ หรือ 290 $MtCO_2e$ /year ในแง่ของแหล่งที่มา)

CCS คือการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งที่มาเช่นเตาเผาซีเมนต์ และการสะสมโดยวิธีการ เช่นการฉีดลงไปใต้ดินสำหรับการกักเก็บถาวร CCS สามารถนำไปใช้กับโรงงานผลิตซีเมนต์ที่ตั้งใหม่หรือปรับใช้กับโรงงานที่มีอยู่แล้ว

4.) การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่

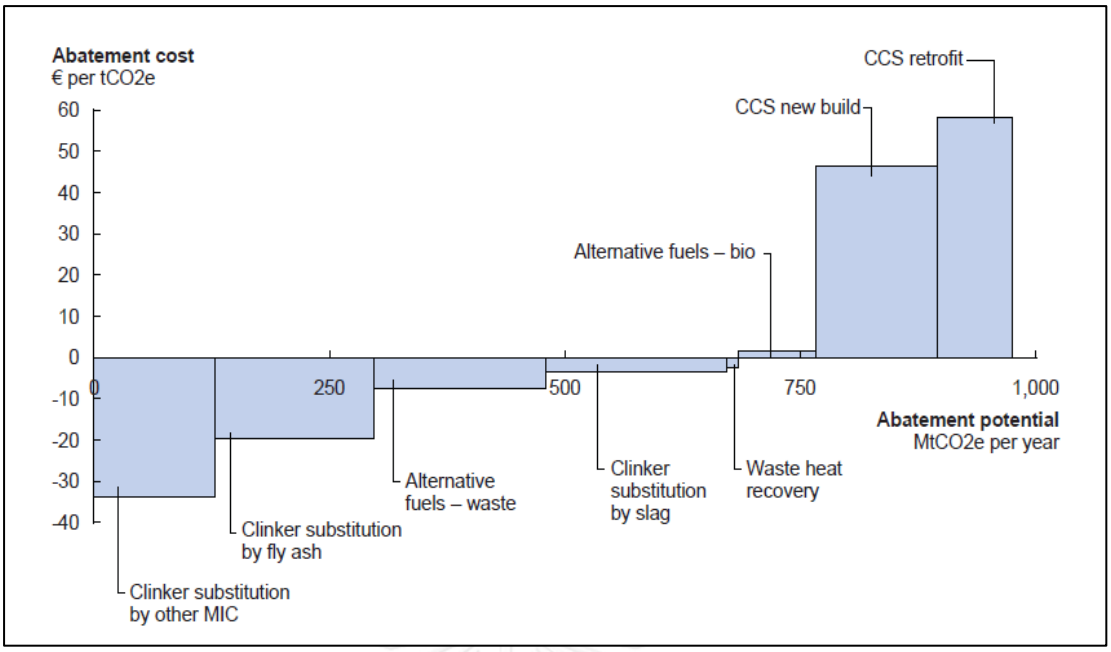
(1% ของศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกหรือประมาณ 12 $MtCO_2e$/year)

การใช้ความร้อนส่วนเกินจากกระบวนการเผาไหม้เม็ดปูนในการผลิตไฟฟ้า ช่วยลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าเฉลี่ย 15 kWh/t จึงเป็นการช่วยลดก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม

5.) การปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในเตาเผาเม็ดปูน

แนวทางการลดนี้จะถูกใช้ในกรณีปกติผ่านการต่ออายุสินทรัพย์เม็ดปูน ไม่มีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เพิ่มศักยภาพการปรับปรุงการลดหย่อน การลงทุนที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมการต่อสินทรัพย์ที่มีต่อการมีส่วนร่วมประมาณ 210$MtCO_2e$ ของการลด ดังนั้นการต่ออายุเม็ดปูนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรจะดำเนินการ มาตรการประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นสำหรับโรงงานเดิมและใหม่ดูเหมือนเป็นไปเกินต่ออายุสินทรัพย์เม็ด แต่ยังไม่ได้วิเคราะห์นี้เนื่องจากคาดว่าเป็นศักยภาพที่มีขนาดเล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 12 เส้นโค้งแสดงการประมาณศักยภาพสูงสุดของการลดก๊าซเรือนกระจกจากมาตรการต่างๆ สำหรับภาคอุตสาหกรรมซีเมนต์

(ที่มา : McKinsey & Company,Pathways to a Low-Carbon Economy, 2009.)

จากข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องฉบับนี้บริษัท McKinsey & Company ได้ทำการศึกษาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยได้นำเสนอไว้ 4 เทคโนโลยี หนึ่งในนั้นคือการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นแนวทางที่มีต้นทุนต่ำ และมีความคุ้มค่า แต่การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาในภาพรวมของทั้งโลก ไม่ได้ศึกษาเฉพาะเจาะจงแค่ประเทศไทย

2.8 สรุปแนวคิด นโยบายและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการที่ IEA และ WBCSD CSI ได้ออกมาตรการและแนวทางในการลดก๊าซเรือนกระจกโดยมีเป้าหมายและทิศทางในการดำเนินการอย่างชัดเจนในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่หรือเรียกว่า Cement Technology Roadmap 2009 Carbon Emission Reductions up to 2050 โดยได้นำเสนอแนวทางการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และด้วยพื้นฐานของประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม แนวทางนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาปรับใช้ อีกทั้งในประเทศไทยยังมีการวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยและเถ้าชีวมวลอันได้แก่ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ในสัดส่วนที่เหมาะสม และจากข้อมูลแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2558-2579 (PDP2015) ที่กำหนดให้มีการสร้าง

โรงไฟฟ้าถ่านหิน เพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่มากขึ้น อีกทั้งนโยบายของรัฐจากรายงานแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (AEDP2015) ที่สนับสนุนให้หันมาใช้พลังงานทดแทน เช่นไบโอดีเซลและเอทานอล ทำให้แนวโน้มการปลูกปาล์มน้ำมันและอ้อยสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงปริมาณเถ้าที่จะเพิ่มมากขึ้น สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดเพื่อช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการนำเถ้าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ ช่วยแก้ปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้ง

จากข้อมูลของงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องที่ได้มีการศึกษาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยเทคโนโลยีส่วนใหญ่ที่ทำการศึกษานั้นจะเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับประสิทธิภาพการใช้ความร้อนและไฟฟ้า หรือเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนสูง หากจะนำไปใช้ต้องมีการลงทุนจำนวนมากซึ่งผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์อาจปฏิเสธไม่ลงทุนในเทคโนโลยีดังกล่าว งานวิจัยต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทยก็ไม่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ จะมีก็เพียงแต่งานวิจัยในต่างประเทศที่ได้นำเสนอต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด โดยข้อมูลที่ใช้คิดก็เป็นข้อมูลพื้นฐานของประเทศนั้นๆ ซึ่งหากประเทศไทยจะยึดนำมาใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับต้นทุนต่อหน่วยที่เกิดขึ้น ก็อาจจะเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากข้อมูลพื้นฐานที่แตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศนั้นๆ ดังนั้นจึงได้มีความคิดที่จะวิเคราะห์หาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ตรงกับพื้นฐานของประเทศไทย

การวิเคราะห์หาต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางนี้ไม่เพียงแต่จะแสดงให้เห็นถึงต้นทุนที่เกิดขึ้นแต่ยังสนับสนุนให้แนวทางมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงภาระที่จะเกิดขึ้นกับผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ว่ามีมากน้อยเพียงใด ต้นทุนที่เกิดขึ้นของแนวทางนี้ยังเป็นปัจจัยหลักในการตัดสินใจว่าจะเลือกลงทุนหรือไม่ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่จะส่งผลต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยังแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ควรให้ความสำคัญเพื่อเกิดผลกระทบต่อต้นทุนน้อยที่สุด

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้ศึกษาได้ใช้วิธีการศึกษาโดยการจำลองเส้นทางการขนส่งเถ้าเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบไปด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าชานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาลที่มีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มที่มีการนำกะลาปาล์มและทะลายปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้า ขนส่งไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ตามภาคต่างๆในประเทศไทย แต่เนื่องจากแต่ละเส้นทางมีระยะทางที่ค่อนข้างไกลและสามารถเลือกไปได้หลายเส้นทาง จึงได้ทำการจำลองเส้นทางเพื่อหาระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าทั้ง 3 ชนิด โดยมีจุดเริ่มต้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่มีเถ้าแต่ละชนิดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทำการขนส่งไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ตามแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย

3.1 การคิดต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การตัดสินใจที่จะลงทุนในโครงการใดโครงการหนึ่งของผู้ประกอบการ ย่อมต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อบ่งบอกถึงต้นทุนและผลประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นจากโครงการนั้นๆ ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นก็มีได้หลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นในรูปตัวเงินและผลโยชน์ที่อยู่ในรูปของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการตัดสินใจลงทุนในโครงการ เช่นเดียวกับงานวิจัยชิ้นนี้ที่ผู้ศึกษาได้นำหลักการการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้น (Cost – Benefit Analysis : CBA) จากแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยแบ่งออกเป็นส่วนของต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นในมุมมองของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

$$CO_2\ Abatement\ Cost = \frac{Cost - Benefit}{A + TC - OC}{Q}$$

จากสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าหากผลลัพธ์ของต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มีค่าเป็นลบ (AC < 0) นั่นหมายถึงแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นๆ มีประโยชน์เกิดขึ้นมากกว่าต้นทุนที่จ่ายไป แนวทางดังกล่าวนั้นไม่ต้องการการลงทุนเพิ่มเติมหรือการเงินทุนเพิ่มเติมในส่วนของค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน แต่หากผลลัพธ์ของต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเป็นบวก (AC > 0) นั่นหมายถึงแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มี

ค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นมากกว่าประโยชน์ที่ได้รับจากการดำเนินแนวทางนั้นๆ หากจะดำเนินแนวทางดังกล่าวต่อจำเป็นที่จะต้องมีเงินทุนเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถดำเนินการต่อไปได้

จากสมการของ McKinsey & Company นั้นจะมีการวิเคราะห์ในส่วนผลต่างระหว่างต้นทุนที่เกิดขึ้นของแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพกับต้นทุนที่เกิดขึ้นของการดำเนินงานในแบบเดิม หารด้วยผลต่างของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการดำเนินงานแบบเดิมกับปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$\text{Abatement Cost} = \frac{\text{Full Cost of } CO_2 \text{ efficient alternative} - \text{Full cost of reference solution}}{CO_2 \text{ emissions from reference solution} - CO_2 \text{emissions from alternative}}$$

$$CO_2\ Abatement\ Cost = \frac{A + TC - OC}{Q}$$

จากการเปรียบเทียบสมการที่ใช้วิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในงานวิจัยฉบับนี้กับสมการของ McKinsey & Company จะเห็นได้ว่ามีความคล้ายกัน โดยในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด จะวิเคราะห์เฉพาะต้นทุนที่เกิดขึ้นของแนวทางเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงกำหนดให้ต้นทุนที่เกิดขึ้นของการดำเนินงานในแบบเดิม(Full cost of reference solution) มีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการข้างต้นสำหรับใช้วิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยในงานวิจัยนี้ ในส่วนของการวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง (Q) นั้น จะวิเคราะห์ต่อหน่วย 1 ตันปูนเม็ด โดยจะใช้ข้อมูลของสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด อ้างอิงจาก Cement Sustainability Initiative (CSI) มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยรายละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัวจะแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป

3.1.1 ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Abatement Cost)

3.1.1.1 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในส่วนของต้นทุนที่ใช้ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามหลักการการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นของโครงการดังที่แสดงไปแล้วข้างต้น เมื่อพิจารณาส่วนต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น ต้นทุนหลักที่เกิดขึ้นคือต้นทุนเฉลี่ยรายงวด(Annuity of investment : A) และ

ต้นทุนรวมของเถ้า(Total Cost of Ash : TC) ซึ่งประกอบไปด้วย ราคาเถ้าและราคาค่าขนส่งจากโรงไฟฟ้าไปยังโรงงานปูนซีเมนต์

จากข้อมูลที่ได้อธิบายไปข้างต้นเกี่ยวกับแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น เป็นแนวทางที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องจักรใหม่และไม่ต้องการการลงทุนเพิ่มเติม สามารถนำเถ้าไปใช้แทนปูนเม็ดในกระบวนการลิตแบบเดิมได้ แสดงให้เห็นว่าต้นทุนการดำเนินการ(Operating Cost : OC) มีค่าเท่าเดิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือต้นทุนการดำเนินงานที่เกิดขึ้นจากการลดปริมาณปูนเม็ด การดำเนินโครงการใหม่โดยที่ไม่มีต้องเพิ่มต้นทุนการดำเนินการถือเป็นผลประโยชน์ที่อยู่ในรูปแบบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นกับผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์

เมื่อนำมาคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถคิดได้ตามสมาการด้านล่าง

$$AC = \frac{A + TC - OC}{Q}$$

โดยที่ AC = ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Abatement Cost) หน่วย THB/t_{CO2}

A = ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (Annuity of investment) หน่วย THB/year

TC = ต้นทุนรวมของเถ้า (Total Cost of Ash) หน่วย THB/year

OC = ต้นทุนการดำเนินงาน (Operating Cost) หน่วย THB/year

Q = ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง Quantity of CO_2 mitigation หน่วย t_{CO2}/year

* การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูเม็ด จะวิเคราะห์เทียบเท่าที่อัตราส่วน 1 : 1 กล่าวคือ 1 ตันเถ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทน เท่ากับ 1 ตันปูนเม็ดที่ลดลงไปจากการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทน

ผลลัพธ์ที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

เมื่อ AC < 0 แสดงว่าแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นๆ มีประโยชน์เกิดขึ้นมากกว่าต้นทุนที่ใช้ ทำให้ไม่ต้องการเงินลงทุนเพิ่มเติมหรือการสนับสนุนต้นทุนการดำเนินงาน

เมื่อ AC > 0 แสดงว่าแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นๆ มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นมากกว่าประโยชน์ที่ได้รับ หากจะดำเนินแนวทางดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องมีเงินทุนเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถดำเนินการต่อไปได้

3.1.1.2 ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (Annuity of investment)

$$A = Ii \div \left\{ 1 - \frac{1}{(1+i)^N} \right\}$$

โดยที่ A = ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (Annuity of investment) หน่วย THB/year

I = เงินลงทุน (Investment) หน่วย THB

i = อัตราคิดลด (Discount Rates) หน่วย %/year

N = อายุการใช้งานของอุปกรณ์ (Economic life of equipment) หน่วย year

ในส่วนของอัตราคิดลดที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โดยมีที่มาจากสมการด้านล่าง

$$WACC + X$$

โดยที่ WACC = ต้นทุนทางการเงินเฉลี่ยของเงินทุน (Weight Average Cost of Capital)

X = ผลตอบแทนส่วนเกินสำหรับผู้ประกอบการ

จากข้อมูลที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นเกี่ยวกับแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น ไม่ต้องมีการลงทุนติดตั้งเครื่องจักรใหม่เพิ่มเติม ดังนั้นในส่วนของตัวแปร I หรือเงินลงทุนมีค่าเป็น 0 THB ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยรายงวดมีค่าเท่ากับ 0 THB/year

3.1.1.3 ต้นทุนการดำเนินงาน (Operating Cost)

ในส่วนของต้นทุนการดำเนินงานจะใช้ข้อมูลที่ได้มาจากการเก็บข้อมูลจากโรงงานปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นข้อมูลในปี พ.ศ.2558 เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตามกระบวนการผลิตเดิม และจากข้อมูลที่ได้เกี่ยวกับแนวทางการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด ที่สามารถนำเถ้ามาผสมกับปูนเม็ดก่อนขั้นตอนการบดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบเดิม ถือเป็นผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นกับทางโรงงานปูนซีเมนต์ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นต้นทุนการดำเนินงานที่เกิดขึ้นจากการลดปริมาณปูนเม็ด

3.1.1.4 ต้นทุนรวมของเถ้า (Total Cost of Ash)

ต้นทุนรวมของเถ้าแต่ละชนิดประกอบไปด้วยราคาเถ้ารวมกับอัตราค่าขนส่งคูณกับระยะที่ใช้ในการขนส่งเถ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ โดยคิดเป็นต้นทุนรวมของเถ้าต่อเที่ยวการขนส่งคูณกับจำนวนเที่ยวของการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดต่อปี

$$TC = NT * C$$

โดยที่ TC = ต้นทุนรวมของเถ้าแต่ละชนิด (Total Cost of Ash) หน่วย THB/year

NT = จำนวนการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดต่อปี (Number of Transportation per year) หน่วย trip/year

C = ต้นทุนของเถ้าต่อเที่ยวการขนส่ง (Ash Cost per trip) หน่วย THB/trip

สมการวิเคราะห์หาจำนวนการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดโดยคิดเป็นจำนวนเที่ยวการขนส่งต่อปี

$$NT = \frac{q_j}{30 t_{Ash}/trip}$$

โดยที่ NT = จำนวนการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดคิดเป็นจำนวนเที่ยวต่อปี (Number of Transportation per year) หน่วย trip/year

q_j = ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (Quantity of clinker save by abatement option) หน่วย $t_{Clinker}$/year

30 t_{Ash}/trip = ปริมาณเถ้าที่สามารถบรรทุกได้ต่อเที่ยว

สมการวิเคราะห์หาต้นทุนของการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดคิดเป็นต้นทุนต่อเที่ยวการขนส่ง

$$C = \left(AP_j + (T * D_j)\right) * 30 t_{Ash}/trip$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ C = ต้นทุนของเถ้าคิดเป็นต่อเที่ยวการขนส่ง (Ash Cost per trip) หน่วย THB/trip

AP = ราคาของเถ้าแต่ละชนิด (Ash Price) หน่วย THB/t_{Ash}

T = อัตราค่าขนส่ง (Transportation Rate) หน่วย THB/t_{Ash}/km

D = ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด (Distance of Transportation) หน่วย km

30 t_{Ash}/trip = ปริมาณเถ้าที่สามารถบรรทุกได้ต่อเที่ยว

ข้อมูลของราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งที่ใช้เป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากโรงผลิตไฟฟ้าและโรงงานปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นข้อมูลในปี พ.ศ.2558

* 1เที่ยวการขนส่งสามารถบรรทุกได้ประมาณ 30 t_{Ash}/trip

3.1.1.5 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง (Quantity of mitigated CO_2)

$$Q = \sum_j q_j EF$$

โดยที่ Q = ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง (Quantity of mitigated CO_2)
หน่วย t_{CO2}/year

q_j = ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (Quantity of clinker save by abatement option)
หน่วย $t_{Clinker}$/year

EF = สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (Emissions Factor)
หน่วย $t_{CO2}/t_{Clinker}$

* การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูเม็ด จะวิเคราะห์เทียบเท่าที่อัตราส่วน 1 : 1 กล่าวคือ 1 ตันเถ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนเท่ากับ 1 ตันปูนเม็ดที่ลดลงไปจากการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทน

3.1.1.6 กรณีการวิเคราะห์และที่มาของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

การวิเคราะห์หาต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูซีเมนต์ในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กรณีด้วยกันดังนี้ คือ

<u>กรณีที่ 1</u> ราคาเถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน รวมถึงอัตราค่าขนส่ง อ้างอิงตามข้อมูลในปี พ.ศ. 2558

เนื่องจากเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและยังไม่มีแนวทางการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ดังนั้นจึงเป็นเถ้าที่ไม่มีราคาต่างจากเถ้าลอยซึ่งมาการนำเอาไปใช้ทำให้มีราคาในการซื้อขาย ในส่วนของอัตราค่าขนส่งผู้ศึกษาได้กำหนดให้รถที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นรถชนิดเดียวกันดับเถ้าลอย ดังนั้นอัตราค่าขนส่งของเถ้าลอย เถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีค่าเท่ากัน

<u>กรณีที่ 2</u> อัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าชานอ้อยและราคาเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าเท่ากับราคาเถ้าลอย อ้างอิงตามข้อมูลของราคาเถ้าลอยในปี พ.ศ.2558

หากมีการกำหนดให้ใช้เถ้าชานอ้อยหรือเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด จะทำให้เถ้าทั้งสองชนิดนี้มีราคาเพิ่มขึ้นตามการซื้อขายที่มีในตลาด ดังนั้นในกรณีที่ 2 นี้ผู้ศึกษาได้กำหนดให้อัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันมีราคาเท่ากับเถ้าลอยในปัจจุบัน

<u>กรณีที่ 3</u> อัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าในอนาคตมีค่าสูงขึ้น

เนื่องมาจากการซื้อขายเพิ่มสูงขึ้นและราคาค่าเชื้อเพลิงในการขนส่งมีค่าสูงขึ้น โดยกำหนดให้ราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งของเถ้าทั้ง 3 ชนิดมีมีค่าเท่ากัน จากข้อมูลในปีพ.ศ. 2544 เถ้าลอยมีราคาอยู่ที่ตันละ 70 บาท เมื่อรวมกับค่าขนส่งแล้ว จะมีราคาอยู่ที่ 1000 บาท [19] ซึ่งต่างจากค่าในปัจจุบัน จึงเป็นไปได้ว่าในอนาคตราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งมีโอกาสที่จะเพิ่มสูงขึ้น ผู้ศึกษาจึงได้กำหนดให้การวิเคราะห์หาต้นทุนในกรณีที่ 3 จะเป็นการวิเคราะห์ที่อัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าที่เพิ่มสูงขึ้นจากค่าในปัจจุบัน

ข้อมูลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้จะใช้ข้อมูลที่ปีพ.ศ. 2558 และข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ โรงงานปูนซีเมนต์ โรงไฟฟ้าถ่านหิน และโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยรายละเอียดของแต่ละข้อมูลจะแสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป

การนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

จากงานวิจัยในประเทศไทยเกี่ยวกับคุณสมบัติของเถ้าทั้ง 3 ชนิดนั้นพบว่าสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดได้ แต่ด้วยขนาดของเถ้าที่มีขนาดใหญ่จะต้องนำไปผ่านกระบวนการบดก่อนเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด ในเบื้องต้นผู้ทำการศึกษาคาดว่าจำเป็นที่จะต้องมีการลงทุนในการติดตั้งเครื่องจักรใหม่เพื่อใช้สำหรับการบดเถ้าให้ได้ขนาดที่เหมาะสม แต่จากการเก็บข้อมูลและสอบถามผู้เชี่ยวชาญ พบว่ากระบวนการบดเถ้านั้นไม่จำเป็นที่จะต้องติดตั้งเครื่องจักรใหม่ เนื่องจากสามารถนำเถ้าไปผสมกับปูนเม็ดก่อนขั้นตอนการบดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการดำเนินงานอยู่แล้วได้ และเถ้าที่ผ่านกระบวนการบดออกมาแล้วนั้นก็มีขนาดที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดได้ จากข้อมูลที่ได้ในส่วนนี้ทำให้ทราบว่าแนวทางการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้นไม่ต้องมีการลงทุนเพิ่ม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เงินลงทุน(Investment) มีค่าเท่ากับศูนย์ (I = 0 THB)

เมื่อส่วนของเงินลงทุนมีค่าเท่ากับศูนย์แล้ว ดังนั้นการกำหนดอัตราดอกเบี้ยคิดลด (Discount Rate) จึงไม่มีผลต่อต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (Annuity of investment) เนื่องจากไม่มีการลงทุนในโครงการ ส่งผลทำให้ผลลัพธ์ของต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (Annuity of investment) มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย (A = 0 THB/year)

ต้นทุนรวมของเถ้า

การคิดต้นทุนรวมของเถ้า (Total cost of ash : TC) เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด มีปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ 3 ส่วนคือ ราคาของเถ้า รวมกับ อัตราค่าขนส่งคูณกับระยะทาง ข้อมูลทั้งหมดเป็นข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์โรงงานปูนซีเมนต์ โรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงไฟฟ้าชีวมวล

ราคาของเถ้าที่ใช้วิเคราะห์ ได้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์โรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยเถ้าลอยมีราคาอยู่ที่ตันละ 170 THB/t_{Ash} เถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นเถ้าที่เป็นขยะเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าชีวมวล และไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ เถ้าทั้งสองชนิดจึงมีราคาอยู่ที่ 0 THB/t_{Ash}

อัตราค่าขนส่งที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอ้างอิงตามอัตราค่าขนส่งของเถ้าลอยที่มีอยู่ในปัจจุบัน จากการเก็บข้อมูลของการขนส่งเถ้าลอยที่มีอยู่ในปัจจุบันพบว่า ผู้ที่ทำหน้าที่ในการขนส่งเถ้าลอยนั้นจะเป็นบริษัทที่จัดตั้งขึ้นมาเพื่อให้บริการในการดำเนินการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ตามที่ต่างๆ โรงไฟฟ้าถ่านหินมีหน้าที่เพียงแค่การจำหน่ายและส่งมอบเถ้าลอย แต่ไม่ได้มีบริการในส่วนของการจัดส่งไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ การจำหน่ายเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าจะทำเป็นสัญญาระยะยาว โดยจะมีการระบุจำนวนและระยะเวลาการเรียกชำระเงินเป็นงวด เดือนละงวด

สำหรับรถที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอยในปัจจุบัน จะเป็นยานพาหนะเฉพาะทาง(Specialized Vehicle) ที่เรียกว่า รถไซโล หรือ รถบัลค์ (Bulk Truck) เนื่องจากเป็นรถที่เป็นระบบปิดและมีระบบการอัดบีบอากาศจากคอมเพรสเซอร์ที่ติดตั้งในยานพาหนะและเทผงเม็ดที่บรรทุกได้โดยการอัดแรงดันเข้าไปภายในแท็งก์ให้ผงเม็ดไหลออก เหมาะแก่การใช้งานการขนส่งเถ้า [20]

รูปที่ 13 รถไซโลหรือรถบัลค์ที่ใช้ในการขนส่งเถ้า
(ที่มา : http://www.cranedd.com)

จากข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์อัตราค่าขนส่งมีค่าเท่ากับ 3.15 THB/t_{Ash}/km และผู้ศึกษาจะกำหนดให้รถที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นรถแบบเดียวกันกับรถที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอย เนื่องจากระยะทางที่ใช้ในการขนส่งค่อนข้างไกลอีกทั้งยังเป็นการป้องกันการฟุ้งกระจายของเถ้าหรือการร่วงหล่นตามพื้นถนนซึ่งอาจเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อผู้อื่นได้

จากข้อมูลการขนส่งเถ้าลอยพบว่าในหนึ่งวันจะมีรถขนส่งเถ้าลอยประมาณ 150 คัน หรือประมาณ 4000 – 5000 ตันต่อวัน [21] เท่ากับรถหนึ่งคันสามารถขนเถ้าลอยได้ประมาณ 30 ตันต่อเที่ยวการขนส่ง(trip) ซึ่งปริมาณการขนส่งเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันต่อเที่ยวการขนส่งจะอ้างอิงตามปริมาณการขนส่งเถ้าลอยคือ 30 t_{Ash}/trip ดังนั้นการคิดต้นทุนค่าขนส่งและราคาเถ้าต่อปี จะวิเคราะห์โดยการนำปริมาณเถ้าที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดหารด้วยปริมาณของเถ้าที่ขนส่งต่อเที่ยวคูณกับต้นทุนของเถ้ารวมกับต้นทุนการขนส่งตามระยะทางที่ใช้ในการขนส่งของเถ้าแต่ละชนิด

เนื่องจากระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้ามีหลายเส้นทาง แต่ละเส้นทางมีระยะทางที่แตกต่างกันซึ่งมีผลโดยตรงกับต้นทุนของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เถ้าเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด การจำลองเส้นทางการขนส่งแต่ละเส้นทางนั้นทำขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาระยะทางเฉลี่ยที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด จึงได้กำหนดโรงงานต่างๆที่ใช้ในการจำลองเส้นทาง ประกอบไปด้วย

- โรงงานผลิตปูนซีเมนต์จำนวนทั้งสิ้น 12 โรง
  (อ้างอิงตามข้อมูล สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย)

- โรงงานผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตทั้งที่มีอยู่ในปัจจุบันและที่จะเกิดขึ้นตามแผน PDP2015 มีทั้งสิ้น 6 โรง
  (อ้างอิงตามข้อมูลจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า พ.ศ.2558)

- โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตจำนวนทั้งสิ้น 51 โรง
  (อ้างอิงข้อมูลตามคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล)

- โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้กากปาล์มเช่น กะลาปาล์มและทะลายปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จำนวน 20 โรง
  (อ้างอิงข้อมูลตามสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน))

*รายชื่อของโรงงานแต่ละโรงรวมไปถึงกำลังการผลิตไฟฟ้าจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งสำหรับการวิเคราะห์หาต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งนี้ เป็นระยะทางที่ใช้ขนส่งเถ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหรือโรงไฟฟ้าชีวมวลไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ตามที่ต่างๆ แต่เนื่องจากเส้นทางในการขนส่งเถ้าทั้งสามชนิดมีหลายเส้นทาง ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการวิเคราะห์หาระยะทางเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weight Average Method) โดยคำนวณจากระยะทางหารด้วยกำลังการผลิตไฟฟ้าของแต่ละโรง เนื่องจากกำลังการผลิตเถ้าแต่ละโรงขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยข้อมูลใช้คิดจะแสดงอยู่ใน ภาคผนวก ก

$$D_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i * MW_i}{\sum_{i=1}^{n} MW_i}$$

โดยที่ D_i = ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งของแต่ละโรง (Distance) หน่วย km

MW_i = กำลังการผลิตไฟฟ้าของแต่ละโรง หน่วย MW

ผลจากการวิเคราะห์ระยะทางเฉลี่ยที่ใช้ในการขนส่งของเถ้าแต่ละชนิด แสดงอยู่ในตารางด้านล่าง

ตารางที่ 1 ระยะทางเฉลี่ยที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด โดยวิธีการถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

ชนิดเถ้า	**ระยะทางเฉลี่ยที่ใช้ในการขนส่ง (km)**
เถ้าลอย	607.96
เถ้าชานอ้อย	383.51
เถ้าปาล์มน้ำมัน	732.13

ต้นทุนการดำเนินงาน

ต้นทุนการดำเนินงาน(Operating Cost) ที่ใช้วิเคราะห์เป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากโรงงานปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นข้อมูลในปี พ.ศ.2558 เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตามกระบวนการผลิตเดิม ซึ่งตรงกันกับแนวทางการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด ที่สามารถใช้ได้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบเดิม ถือเป็นผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นกับทางโรงงานปูนซีเมนต์ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นต้นทุนการดำเนินงานที่เกิดขึ้นจากการลดปริมาณปูนเม็ด จากการเก็บข้อมูลพบว่า ที่เถ้าลอย 1000 ตันจะมีต้นทุนการดำเนินงานเท่ากับ 5 ล้านบาท ในการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลดังกล่าวเป็นพื้นฐานในการกำหนดต้นทุนการดำเนินงานของเถ้าแต่ละชนิด เทียบตาม

อัตราส่วน 1 : 1 กล่าวคือ ปูนเม็ดที่ลดลงเท่ากับเถ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด โดยข้อมูลของปริมาณเถ้าที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดแต่ละชนิดเฉลี่ยต่อปี เป็นข้อมูลจากงานวิจัยศักยภาพการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศไทยระยะเวลาที่วิเคราะห์ ตั้งแต่พ.ศ.2558-2579 [22] โดยมีค่าดังนี้

ตารางที่ 2 ต้นทุนการดำเนินงานจากการนำเถ้าแต่ละชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

รายละเอียด	**เถ้าลอย**	**เถ้าชานอ้อย**	**เถ้าปาล์มน้ำมัน**
ปริมาณปูนเม็ดที่ลดลงเฉลี่ยต่อปีจากการใช้เถ้าเป็นวัสดุทดแทน ($Mt_{Clinker}$/year)	2.63	1.04	0.55
ต้นทุนการดำเนินงาน (MTHB/year)	13,145.00	5,185.00	2,765.00

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง

วิธีการที่เป็นทางเลือกสำหรับการป้อนข้อมูลพื้นฐานการจัดทำรายงานการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้วัตถุดิบในโรงงานปูนซีเมนต์ จึงได้กำหนดปริมาณของการใช้วัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาในระบบห้องเผาไหม้ (Kiln) มีโรงงานปูนซีเมนต์มากมายที่วัตถุดิบหดหายจากการตรวจสอบการไหลของวัตถุดิบ การวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อวัตถุประสงค์ของกระบวนการและควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยวิธีการป้อนข้อมูลบนพื้นฐานของวัตถุดิบการบริโภคที่ประสบความสำเร็จนำมาใช้ในโรงงานปูนซีเมนต์ในประเทศที่มีความแตกต่างกัน สำหรับ CSI Protocol มีวิธีการตรวจวัดเพื่อจัดทำรายงานทั้งสิ้น 4 แบบคือ

1.) Simple Input Method (A1) – LOI[5] of Raw Meal
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาวัตถุดิบ วิธีการนี้เป็นหลักการพื้นฐานการกำหนดการสูญเสียในการเผาไหม้ของวัตถุดิบ การสูญเสียน้ำหนักในการเผาไหม้ของวัตถุดิบระหว่างนำเข้าเตาเผา

2.) Detailed Input Method (A2) – Input CO_2 Balance
วิธีการสมดุลการนำเข้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีนี้เป็นหลักการพื้นฐานการกำหนดจำนวนของการใช้วัตถุดิบและการวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนไดออไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาโดยรวม

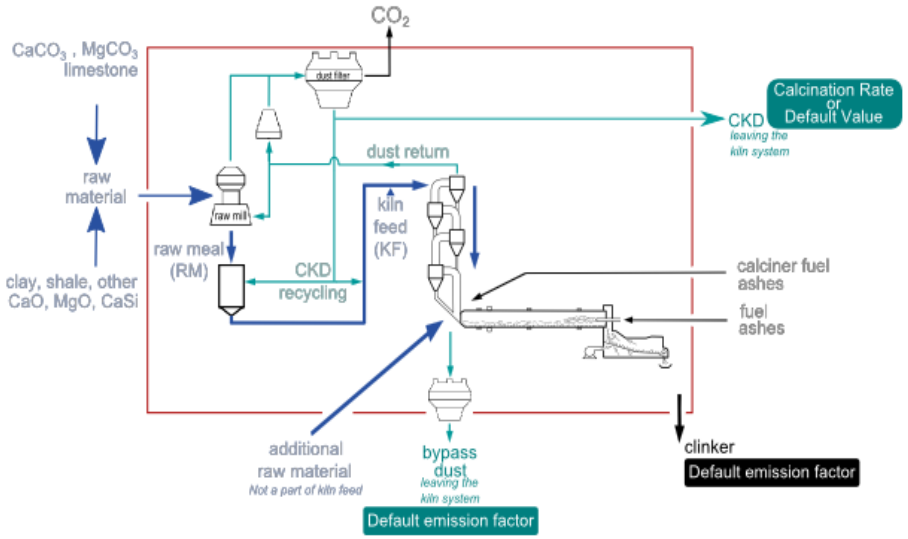
[5] Loss on Ignition คือการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการเผาไหม้ของวัตถุดิบ

3.) Simple Output Method (B1) – Standard Calcination EF
วิธีการอย่างง่ายสำหรับการกำหนดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาวัตถุดิบ โดยวิธีการนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการผลิตปูนเม็ด คำนวณด้วยค่าคงที่ (Emission Factor: EF)

4.) Detailed Output Method (B2) – Corrected Calcination EF
วิธีการกำหนดรายละเอียดของผลลัพธ์ เพื่อคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้ต่อตันปูนเม็ดที่ผลิตได้

สำหรับวิธีการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ใช้วิธีการคำนวณตามมาตรฐานของ CSI (Cement Sustainability Initiative) โดยผลจากการพยากรณ์ปริมาณปูนเม็ดที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจากสมการ(Model) ที่สร้างจากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลของมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศกับปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในอดีต รวมถึงวิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้วิธีการคำนวณตามมาตรฐานของ CSI ใน The Cement CO_2 and Energy Protocol Version 3.1 โดย วิธีการแบบ B1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

Simple Output Method (B1) – Standard Calcination EF วิธีการแบบ B1 เป็นวิธีการคำนวณอย่างง่ายสำหรับกำหนดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการเผาไหม้ของวัตถุดิบ วิธีการนี้ขึ้นอยู่กับการผลิตปูนเม็ด, ฝุ่นเตาเผาปูนซีเมนต์ทางตรง และฝุ่นผงที่หลุดรอดจากระบบเตาเผาทางอ้อม มาตรฐานเดียวกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นปัจจัยจากการเผาไหม้เพื่อให้ได้ปูนเม็ด (โดย CSI ได้กำหนดที่ 0.525 $t_{CO2}/t_{Clinker}$ สำหรับการปล่อยจากกระบวนการทางเคมี) แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 3 Simple Output Method



รูปที่ 14 แผนภาพแสดงกระบวนการที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เฉพาะกระบวนการผลิตปูนเม็ด

(ที่มา: The Cement Sustainability Initiative (CSI))

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะกระบวนการผลิตปูนเม็ดมี 2 ส่วนหลักคือ

1. การปล่อยโดยตรง (Direct CO_2 Emission) แบ่งเป็น 2 ส่วนย่อยคือ

   ก. การปล่อยโดยตรงจากปฏิกิริยาเคมีในเตาเผาไหม้

   (Direct CO_2 Emission from Calcination)

คำนวณจากปริมาณของ $CaCO_3$ และ $MgCO_3$ ที่มีอยู่ในตัวปูนเม็ดคิดโดยน้ำหนัก แสดงได้จากสมการเคมี ดังต่อนี้

$$CaCO_3 \xrightarrow{Heat} CaO + CO_2 \qquad (ก)$$

และ

$$MgCO_3 \xrightarrow{Heat} MgO + CO_2 \qquad (ข)$$

ในปูนเม็ด 1,000 กิโลกรัม ประกอบด้วย CaO ในปริมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก จะมี MgO ในปริมาณร้อยละ 1.4 โดยน้ำหนัก เมื่อคำนวณแล้วพบว่ามีปริมาณของ CaO โดยน้ำหนักที่ 650 กิโลกรัม และมีปริมาณของ MgO โดยน้ำหนักที่ 14 กิโลกรัม ในปริมาณดังกล่าวคำนวณในส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใน CaO ที่ 0.510 t_{CO2} และ 0.015 t_{CO2} ใน MgO ดังนั้น หากคำนวณปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาคายความร้อนดังสมการ ก และ

สมการ ข แล้วจะทำให้ได้ค่าคงที่ ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในเตาเผาที่ 0.525 $t_{CO2}/t_{Clinker}$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ของ CSI ในส่วนการปล่อยจากปฏิกิริยาเคมีในเตาเผา

ข. การปล่อยโดยตรงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

(Direct CO_2 Emission from Fuel Combustion)

ในส่วนนี้มีการคำนวณจากการใช้เชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ ที่อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีการใช้ โดยวิธีการคิดปริมาณการปล่อย CO_2 จาก 2 ส่วนคือ ส่วนแรก CO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้ ทั้งการเผาไหม้ภายในเตาเผา (kiln) และการเผาไหม้นอกเตาเผา เพื่อนำความร้อนที่ได้มาใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การนำความร้อนมาอบไล่ความชื้นก่อนกระบวนการเผาไหม้ เป็นต้น ส่วนที่สอง จากชนิดและประเภทของเชื้อเพลิงทั้ง เชื้อเพลิงฟอซซิล เช่น ถ่านหิน และเชื้อเพลิงทดแทน เช่น ยางรถยนต์เก่า ชีวมวลประเภทต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นหากรวมปริมาณการปล่อย CO_2 ที่มาจากการปล่อยทางตรงทั้ง 2 ส่วน จะทำให้ได้ค่าคงที่ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนเม็ดที่ 0.825 $t_{CO2}/t_{Clinker}$

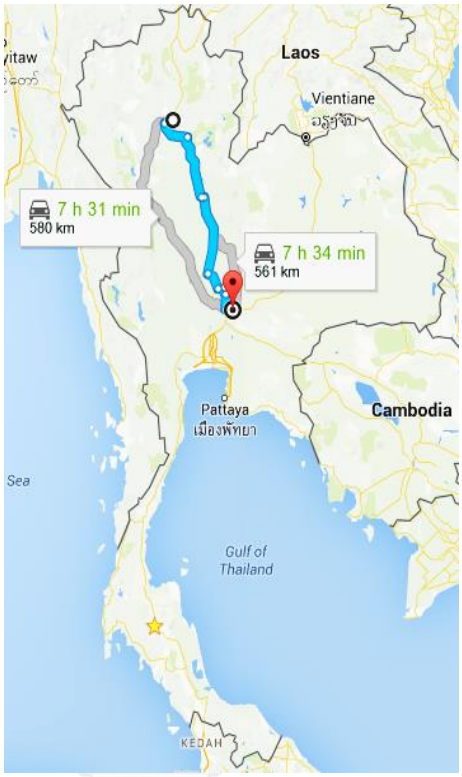
2. การปล่อยโดยอ้อมจากแหล่งอื่นๆ (Indirect CO_2 Emission from External Source) ในส่วนนี้เกิดจากการใช้ไฟฟ้า การคิดปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้น ถูกคิดคำนวณในภาคพลังงานแล้ว และงานวิจัยนี้ไม่นำมาคิดคำนวณ

ดังนั้น กระบวนการที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี Calcination Process และ การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตปูนเม็ดสามารถคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 ส่วน โดยใช้ค่าคงที่ของ CSI ที่ 0.825 $t_{CO2}/t_{Clinker}$ ในการคำนวณของงานวิจัยนี้ ซึ่งหมายความว่าที่ปูนเม็ด 1 ตัน จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.825 $t_{CO2}/t_{Clinker}$ [23]

ระยะทางจริงที่ใช้ในการขนส่งเถ้า

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ทำการจำลองระยะทางจริงที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดจากโรงงานไฟฟ้าไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ เนื่องจากระยะทางมีหลายเส้นทางจึงได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละเส้นทาง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาเส้นทางจริงที่ใช้ในการขนส่งที่จะส่งผลและไม่ส่งผล กระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเทียบนำไประยะทางที่มากที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง (Maximum Distance) ของเถ้าทั้ง 3 ชนิด

เถ้าลอย



รูปที่ 15 ตัวอย่างระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะจังหวัดลำปาง ไปยัง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด-จังหวัดสระบุรี

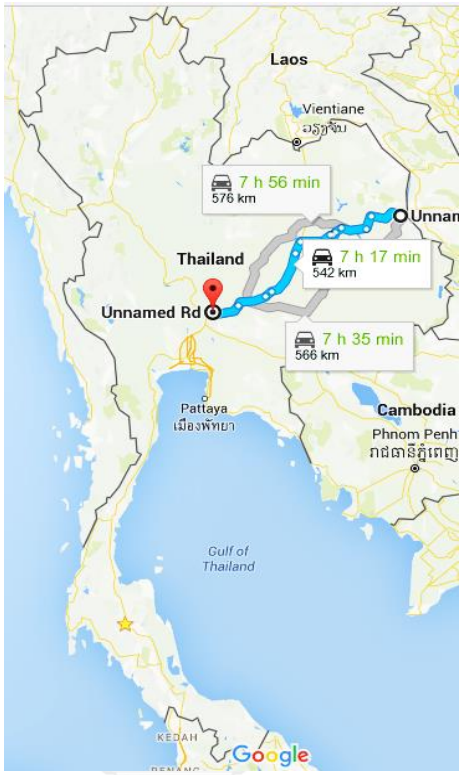
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปเป็นการจำลองเส้นทางการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ไปยัง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย(แก่งคอย) จำกัด จังหวัดสระบุรี จะเห็นได้ว่ามีเส้นทางที่สามารถใช้ขนส่งได้ 3 เส้นทาง ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเพื่อนให้เหลือระยะทางเดียว ซึ่งระยะทางการขนส่งจะกำหนดจุดเริ่มต้น คือ จากโรงงานผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตทั้งที่มีอยู่ในปัจจุบันและที่จะเกิดขึ้นตามแผน PDP2015 มีทั้งสิ้น 6 โรง (อ้างอิงตามข้อมูลจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า พ.ศ.2558) ขนส่งเถ้าลอยไปยังโรงงานผลิตปูนซีเมนต์จำนวนทั้งสิ้น 12 โรง (อ้างอิงตามข้อมูล สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย โดยข้อมูลของระยะทางที่ใช้ในการขนส่งจะถูกแสดงอยู่ในรูปแบบตาราง

ตารางที่ 3 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินไปยังโรงงานปูนซีเมนต์

ระยะทางเฉลี่ยในการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินไปยังโรงงานปูนซีเมนต์													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
1	โรงไฟฟ้าแม่เมาะ-ลำปาง	1390	68	573	563	562	583	581	558	786	465	563	547
2	บริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด-ระยอง	952	826	270	290	284	272	274	290	348	383	289	292
3	โรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.เหนือคลอง-กระบี่	116	1418	926	928	911	927	929	920	642	993	943	929
4	โรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.เทพา - สงขลา 1-2	276	1629	1137	1139	1122	1138	1141	1139	875	1199	1155	1141
5	โรงไฟฟ้าเนชั่นแนลซัพพลาย	889	700	130	151	149	142	145	156	292	254	163	150
6	โรงไฟฟ้าใหม่	952	826	270	290	284	272	274	290	348	383	289	292

เถ้าชานอ้อย



รูปที่ 16 ตัวอย่างระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากบริษัท สหเรือง จำกัด จังหวัดมุกดาหาร ไปยัง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด-จังหวัดสระบุรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปเป็นการจำลองเส้นทางการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากบริษัท สหเรือง จำกัด จังหวัดมุกดาหาร ไปยังบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย(แก่งคอย) จำกัด จังหวัดสระบุรี จะเห็นได้ว่ามีเส้นทางที่สามารถใช้ขนส่งได้ 3 เส้นทาง ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเพื่อนให้เหลือระยะทางเดียว ซึ่งระยะทางการขนส่งจะกำหนดจุดเริ่มต้น คือ โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต จำนวนทั้งสิ้น 51 โรง(อ้างอิงข้อมูลตามคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล) ขนส่งเถ้าชานอ้อยไปยังโรงงานผลิตปูนซีเมนต์จำนวนทั้งสิ้น 12 โรง (อ้างอิงตามข้อมูล สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย) โดยข้อมูลของระยะทางที่ใช้ในการขนส่งจะถูกแสดงอยู่ในรูปแบบตาราง

ตารางที่ 4 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลไปยังโรงงานปูนซีเมนต์1/3

ระยะทางเฉลี่ยในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรมไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ (1/3)													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG หุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
1	โรงงานน้ำตาลไทยเอกลักษณ์ (อุตรดิตถ์)	1260	171	417	411	410	433	435	401	664	316	402	389
2	บริษัท สหเรือง จำกัด	1437	817	548	585	591	542	544	593	908	611	556	574
3	โรงงานน้ำตาลมิตรกาฬสินธุ์	1351	779	460	495	508	454	456	504	779	526	468	488
4	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลอีสาน (กาฬสินธุ์)	1339	647	464	478	516	458	461	487	802	507	467	472
5	โรงงานน้ำตาลขอนแก่น	1256	682	375	389	402	371	371	398	716	418	374	384
6	โรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง (ขอนแก่น)	1204	531	323	329	341	321	322	339	666	365	315	324
7	โรงงานรวมเกษตรกรอุตสาหกรรม (ชัยภูมิ)	1198	564	320	324	335	316	317	333	636	334	449	319
8	โรงงานน้ำตาลวังขนาย (มหาวัง-มหาสารคาม)	1235	694	360	380	393	354	356	389	706	411	362	374
9	โรงงานน้ำตาลเกษตรผล (อุดรธานี)	1293	686	412	426	440	408	408	435	753	473	411	421
10	โรงงานน้ำตาลกุมภวาปี (อุดรธานี)	1305	693	424	438	451	449	420	447	765	485	423	433
11	โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม (อุดรธานี)	1372	642	454	465	496	445	451	474	790	479	453	469
12	โรงงานน้ำตาลเอราวัณ (หนองบัวลำภู)	1314	471	434	437	471	430	445	454	718	443	424	429
13	โรงงานน้ำตาลไทยกาญจนบุรี (อุดรธานี)	1336	593	452	470	482	446	475	525	740	496	451	466
14	โรงงานน้ำตาลขอนแก่น (วังสะพุง)	1296	425	415	418	438	426	413	427	700	401	410	409
15	โรงงานรวมเกษตรกรมิตรภูหลวง (เลย)	1293	430	408	410	433	419	405	421	697	394	402	402
16	โรงงานน้ำตาลบุรีรัมย์	1176	792	315	328	353	309	312	336	587	378	306	326

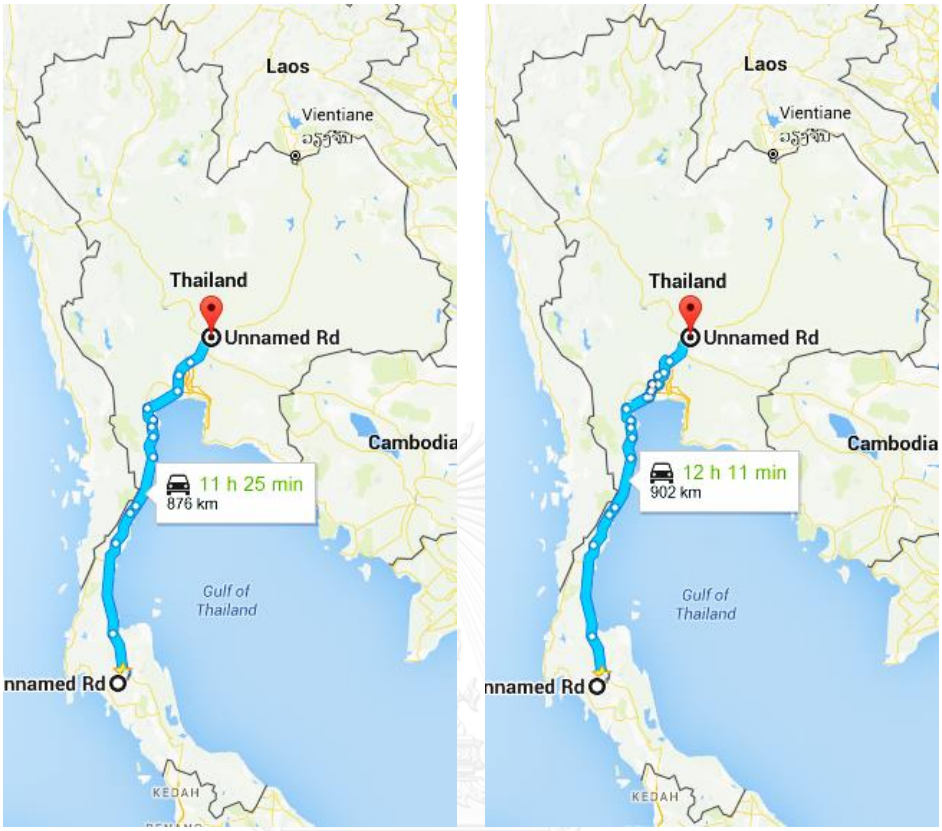
ตารางที่ 4 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลไปยังโรงงานปูนซีเมนต์2/3

ระยะทางเฉลี่ยในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรมไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ (2/3)													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
17	โรงงานอุตสาหกรรมโคราช (นครราชสีมา)	1078	693	200	232	244	194	197	246	482	310	209	285
18	โรงงานอุตสาหกรรมอ่างเวียน (นครราชสีมา)	1136	634	244	259	280	240	241	269	540	285	234	254
19	โรงงานน้ำตาลครบุรี (นครราชสีมา)	1064	722	174	209	228	168	170	226	468	295	184	217
20	โรงงานน้ำตาลสุรินทร์ (สุรินทร์)	1167	823	317	354	355	272	274	357	571	385	327	347
21	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลสุพรรณบุรี(สุพรรณบุรี)	882	539	132	111	99	139	141	104	277	105	132	118
22	บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด (สุพรรณบุรี)	886	553	177	146	138	183	185	138	312	124	171	153
23	โรงงานน้ำตาลรีไฟน์ชัยมงคล (อู่ทอง-สุพรรณบุรี)	818	588	156	140	122	159	161	133	254	149	166	147
24	โรงงานน้ำตาลสิงห์บุรี (สิงห์บุรี)	977	474	141	120	124	157	159	113	373	12	130	119
25	โรงงานน้ำตาลสระบุรี (สระบุรี)	934	565	41	41	62	53	46	53	350	125	21	33
26	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ที.เอ็น. (ลพบุรี)	961	557	73	74	90	76	70	77	376	110	55	65
27	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ (อุทัยธานี)	902	509	198	175	169	212	220	167	305	127	200	187
28	โรงงานน้ำตาลทิพย์กำแพงเพชร (กำแพงเพชร)	1091	353	297	242	259	313	301	251	495	175	282	246
29	โรงงานน้ำตาลทิพย์สุโขทัย (สุโขทัย)	1279	182	446	450	420	488	479	411	683	337	439	447
30	โรงงานน้ำตาลพิษณุโลก (พิษณุโลก)	1123	326	285	267	274	304	307	364	527	189	277	270
31	โรงงานน้ำตาลทรายกำแพงเพชร (กำแพงเพชร)	1106	318	300	257	286	295	343	278	509	189	290	260
32	โรงงานน้ำตาลนครเพชร (กำแพงเพชร)	1110	314	304	282	289	299	345	280	513	192	287	264
33	โรงงานรวมผลอุตสาหกรรมนครสวรรค์ (นครสวรรค์)	1021	398	221	172	186	226	231	173	425	95	199	175
34	โรงงานเกษตรไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล (นครสวรรค์)	976	461	156	133	128	189	191	127	380	35	152	138
35	โรงงานไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม (เพชรบูรณ์)	1007	532	123	125	136	134	117	135	410	130	113	118

ตารางที่ 4 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลไปยังโรงงานปูนซีเมนต์3/3

ระยะทางเฉลี่ยในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรมไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ (3/3)													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
36	โรงงานอุตสาหกรรมมิตรเกษตร (อุทัยธานี)	998	440	232	209	209	245	252	196	419	119	235	210
37	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลชลบุรี (ชลบุรี)	860	742	197	213	210	199	202	220	264	295	214	204
38	โรงงานน้ำตาลนิวกว้างสุ้นหลี (ชลบุรี)	862	738	187	196	196	190	192	204	266	288	205	198
39	โรงงานสหการน้ำตาลชลบุรี (ชลบุรี)	874	772	214	228	228	217	219	225	285	306	231	217
40	โรงงานน้ำตาลและอ้อยตะวันออก (สระแก้ว)	968	790	215	264	266	215	217	272	391	308	230	266
41	โรงงานน้ำตาลระยอง (ชลบุรี)	881	759	211	219	225	214	216	232	292	305	229	220
42	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลปราณบุรี (ประจวบคีรีขันธ์)	553	844	344	369	347	347	349	350	54	405	375	348
43	โรงงานน้ำตาลราชบุรี (ราชบุรี)	738	673	195	195	183	198	200	193	142	231	214	199
44	โรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง (ราชบุรี)	742	668	197	195	749	200	202	191	146	228	214	199
45	โรงงานอุตสาหกรรมมิตรเกษตร (กาญจนบุรี)	746	647	205	197	179	201	203	188	157	223	217	201
46	โรงงานน้ำตาลไทยกาญจนบุรี (กาญจนบุรี)	749	645	205	189	175	201	203	183	159	223	217	201
47	โรงงานน้ำตาลนิวกรุงไทย (กาญจนบุรี)	835	606	223	197	184	224	226	191	237	194	219	303
48	โรงงานไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล (กาญจนบุรี)	765	647	202	184	169	205	207	175	188	205	212	191
49	โรงงานน้ำตาลท่ามะกา (กาญจนบุรี)	754	655	206	188	173	209	211	180	177	213	218	203
50	โรงงานประจวบอุตสาหกรรม (กาญจนบุรี)	755	655	206	188	218	209	212	180	178	214	219	203
51	โรงงานไทยเพิ่มพูนอุตสาหกรรมม (กาญจนบุรี)	761	657	210	189	175	212	215	182	166	215	213	195

เถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 17 ตัวอย่างระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจากบริษัท ศรีไสวคลีนพาวเวอร์ จำกัด จังหวัดกระบี่ ไปยัง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด-จังหวัดสระบุรี

จากรูปเป็นการจำลองเส้นทางการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจากบริษัท ศรีไสวคลีนพาวเวอร์ จำกัด จังหวัดกระบี่ ไปยังบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย(แก่งคอย) จำกัด จังหวัดสระบุรี จะเห็นได้ว่ามีเส้นทางที่สามารถใช้ขนส่งได้ 2 เส้นทาง ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเพื่อนให้เหลือระยะทางเดียว ซึ่งระยะทางการขนส่งจะกำหนดจุดเริ่มต้น คือ โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้กากปาล์มเช่น กะลาปาล์มและทะลายปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จำนวน 20 โรง (อ้างอิงข้อมูลตามสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)) ขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันไปยัง โรงงานผลิตปูนซีเมนต์จำนวนทั้งสิ้น 12 โรง (อ้างอิงตามข้อมูล สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย) โดยข้อมูลของระยะทางที่ใช้ในการขนส่งจะถูกแสดงอยู่ในรูปแบบตาราง

ตารางที่ 5 ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงไฟฟ้าชีวมวลไปยังโรงงานปูนซีเมนต์

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรม ไปยัง โรงงานปูนซีเมนต์													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
1	บริษัท สุราษฎร์ธานี กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด	142	1277	787	783	766	783	786	775	492	833	798	784
2	บจก.กรีน เพาเวอร์ สเตชั่น (2552) (สุราษฎร์ธานี)	366	1224	731	733	716	734	736	725	442	783	748	734
3	บจก.กลุ่มปาล์มธรรมชาติ (ชุมพร)	284	1224	614	617	600	617	620	609	326	667	632	645
4	บจก.เจริญน้ำมันปาล์ม (ชุมพร)	333	1118	609	611	594	612	614	604	321	661	627	640
5	บจก.ทรัพย์อนันต์ไบโอแมส (โครงการ1) (ชุมพร)	335	1071	567	569	552	570	562	572	279	619	585	598
6	บริษัท ท่าฉางสวนปาล์มน้ำมันอุตสาหกรรม จำกัด (สุร	166	1233	733	736	719	736	738	728	445	785	751	737
7	บจก.พีดีไอ สุราษฎ์ไบโอแมส (สุราษฎร์ธานี)	230	1202	708	710	693	711	713	703	420	760	726	731
8	บจก.แสงศิริอุตสาหกรรมเกษตร (สุราษฎร์ธานี)	145	1292	799	801	784	802	804	793	510	851	816	821
9	บจก. บจก.เอเอสทีปาล์มออยล์ (ประจวบคีรีขันธ์)	385	1025	522	524	507	525	527	516	233	574	539	552
10	บริษัท ซาราฟเอ็นเนอร์ยี จำกัด (กระบี่)	107	1385	886	888	871	889	891	880	597	938	903	889
11	บจก.ปาล์มพัฒนาไบโอแมส (ปัตตานี)	594	1650	1157	1159	1142	1160	1162	1152	868	1209	1174	1180
12	บจก.ศรีไสวคลีนพาวเวอร์ จำกัด (กระบี่)	69.8	1370	876	878	861	879	881	871	588	937	894	899
13	บจก.โอทาโก้ จำกัด (ตรัง)	74	1467	973	975	958	976	978	968	684	1027	978	996
14	บมจ.สหอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (กระบี่)	93	1378	884	886	869	887	889	879	595	945	902	907
15	บจก.ไทยทาโลว์ แอนด์ ออยล์ (โครงการ 3)	78.2	1461	969	963	949	972	974	958	667	1020	986	968
16	บริษัท ตรัง ไบโอเอเนอร์ยี จำกัด (ตรัง)	90.6	1465	973.5	973	958.5	976.5	978.5	967.5	677	1030.3	996	978
17	บริษัท ไฟฟ้าธรรมชาติ จำกัด (สุราษฎร์)	76.1	1350	857	851.5	837	860	862	846	556	908.7	875	856.5
18	บริษัท เอส เค เพาเวอร์พลัส (สุราษฎร์)	137	1328	841	835	820.5	844	846	830	540	892.7	858.5	840.5
19	บจก.บ้านโป่ง คลีน เอ็นเนอร์ยี (ราชบุรี)	741	679	199	199	187	202	221	195	145	234	226	208
20	บจก. เค บี วัน (นครราชสีมา)	1064	720	200	218	228	166	168	227	473	293	209	210

3.1.2 การสรุปผลในรูปแบบเส้นกราฟต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Abatement Cost Curve)

ต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกสามารถกำหนดได้จากค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นของเทคโนโลยีที่ใช้คิดเปรียบเทียบกับกรณีอ้างอิง หรือ วัดจากต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ ซึ่งต้นทุนนี้จะวัดรวมถึงค่าใช้จ่ายต่อปีของต้นทุนการลงทุนและต้นทุนการดำเนินงาน ต้นทุนส่วนนี้บ่งบอกถึงต้นทุนโครงการในส่วนของการติดตั้งและการดำเนินการเทคโนโลยีที่ใช้ในการลดก๊าซเรือนกระจก โดยจะไม่พิจารณาถึงความพร้อมของต้นทุน

การคิดต้นทุนการลดการลดก๊าซเรือนกระจกนั้น สามารถคิดได้จากสมการด้านล่าง โดยเป็นต้นทุนรวมของเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุนการลงทุน ต้นทุนการดำเนินงาน ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้อันเป็นผลมาจากเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ(หมายถึงการประหยัดพลังงาน) ต้นทุนทั้งหมดนี้ไม่ได้รวมค่าใช้จ่ายในการทำธุรกรรม การสื่อสารข้อมูล เงินอุดหนุน ภาษี หรือผลกระทบต่อเศรษฐกิจ

$$\text{Abatement Cost} = \frac{\text{Full Cost of } CO_2 \text{ efficient alternative} - \text{Full cost of reference solution}}{CO_2 \text{ emissions from reference solution} - CO_2 \text{emissions from alternative}}$$

เส้นต้นทุนใช้มุมมองที่เฉพาะเจาะจงทางสังคมแทนการตัดสินใจ มุมมองของสังคมนั้นทำให้เส้นต้นทุนการลดค่าใช้จ่ายเป็นสิ่งที่ใช้ในการอภิปรายในระดับสากลเกี่ยวกับมาตรการการลดก๊าซเรือนกระจก สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์เส้นต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกนี้ คือ “ถ้ารัฐบาลต้องการให้เกิดมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกขึ้น มาตรการที่เกิดขึ้นนั้นมีจะสามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้เท่าไหร่ และงบประมาณการลงทุนอย่างต่ำเท่าไหร่เพื่อให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก(จากมุมมองของสังคม)” ต้นทุนทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในปัจจุบันและจาการประมาณการ ซึ่งการประมาณการจะอยู่บนพื้นฐานของวิธีการของโครงการที่สามารถใช้ได้ เช่น รูปแบบ(ถ้ามี), มุมมองของผู้เชี่ยวชาญและการคาดการณ์ที่ได้จากการศึกษา กำหนดระยะเวลานาน 25 ปี การคาดการณ์ที่ผิดพลาดบางประการนั้นเกิดจากวิธีการ ตัวแปรทางด้านเศรษฐศาสตร์มหัพภาค เช่น อายุการใช้งานของสินทรัพย์, อัตราดอกเบี้ย, ราคาน้ำมันและอัตราแลกเปลี่ยนเงินนั้นส่งผลกระทบมมากที่สุดกับผลลัพธ์และความผิดพลาดของกำไรที่ได้ การให้ความสำคัญการประมาณการต้นทุนของแต่ละมาตรการลดลงนั้น ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญโดยรวมต่อแต่ละมาตรการ

ต้นทุนเกี่ยวกับการทำธุรกรรม หรือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทำการแลกเปลี่ยนทางเศรษฐกิจนั้น ในทางเทคนิคแล้วอยู่นอกเหนือไปจากต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจก (เช่น การศึกษา, การรักษา, ค่าใช้จ่ายในการบังคับใช้) อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของมาตรการการลดก๊าซเรือนกระจกถือ

เป็นส่วนหนึ่งในการทำธุรกรรม เช่น การรณรงค์เพื่อให้ข้อมูล และการฝึกอบรม ซึ่งต้นทุนในส่วนนี้ไม่ได้ถูกนำมารวมในเส้นต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจก

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเพื่อให้ส่งผลต่อการลดก๊าซเรือนกระจกนั้น ไม่ได้ถูกนำมารวมในเส้นต้นทุน แม้ว่ามีการนำเสนอศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกจากการเปลี่ยนแปลงทางพฤติกรรม ซึ่งอาจถูกขับเคลื่อนโดยสิ่งต่างๆ ทั้งที่เป็นตัวเลขราคาและไม่ใช่ตัวเลขราคา ตัวอย่างเช่น การศึกษาของประชาชน, การรณรงค์ด้านสาธารณสุข, กระแสสังคม หรือ การเปลี่ยนแปลงนโยบาย ด้วยเหตุนี้การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมถูกวิเคราะห์แยกต่างหากจากเส้นต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจก โดยจะถือว่าเป็น “ศักยภาพเพิ่มเติม” ไม่ได้เกี่ยวกับต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกแต่อย่างใด[15]

เส้นกราฟแสดงต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่และเทคโนโลยีหรือมาตรการ ในแกน Y จะแสดงถึงต้นทุนที่ใช้ในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละมาตรการ มีหน่วยเป็น THB/t_{CO2} และความกว้างของแถบแต่ละแถบในแนวแกน X แสดงถึงศักยภาพของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมาตรการนั้นๆ มีหน่วยเป็น $Mt_{CO2}/t_{Clinker}$ โดยมาตรการที่อยู่ทางด้านซ้ายและอยู่ใต้แกน X จะเป็นมาตรการที่มีต้นทุนต่ำกว่ามาตรการที่อยู่ด้านขวาและอยู่เหนือแกน X ดังแสดงในรูปที่ 11

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้ศึกษาจะทำการเปรียบเทียบต้นทุนของการลดก๊าซเรือนกระจกเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถือเป็นหนึ่งในชนิดของก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาจำนวนมาก โดยใช้ข้อมูลปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากแนวทางการนำเถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน ระยะเวลาการศึกษาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2558 - 2579 จากงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว [22]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลด

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่จะส่งผลต่อโครงการ ใช้ประเมินการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงกว่า เปรียบเทียบให้เห็นว่าปัจจัยใดส่งผลต่อโครงการมากกว่ากัน ปัจจัยที่กล่าวถึงนั้นเป็นไปได้หลายอย่าง เช่น ต้นทุน ต้นทุนโครงการ หรือ ต้นทุนการดำเนินงาน เป็นต้น

ในการวิเคราะห์หาต้นทุนโดยใช้มุมมองของผู้ศึกษา การสอบถามข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญและข้อมูลพื้นฐานในปี พ.ศ. 2558 จากตัวแปรต่างต่างๆเหล่านี้อาจส่งผลต่อการคาดการณ์ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เมื่อระยะเวลาผ่านไป ต้นทุนที่ได้อาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือหน้อยลง ขึ้นอยู่การ

ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้นำปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวทั้งสิ้น 2 ปัจจัยดังนี้ คือ 1. อัตราค่าขนส่ง และ 2. ราคาของเถ้า เพื่อที่จะวิเคราะห์ว่า หากเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของทั้ง 2 ปัจจัยซึ่งอาจเป็นผลมาจากนโยบายของรัฐการซื้อราคาของเถ้าที่จะเพิ่มขึ้นตามการซื้อขายเมื่อมีการนำไปใช้งาน หรืออัตราค่าขนส่งที่เปลี่ยนแปลงไปตามราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่ง จะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากน้อยเพียงใด อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ หากมีการผลักดันให้นำเถ้ามาใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์แล้วนั้น จะต้องระวังปัจจัยใดที่จะส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการผลิต

3.3 **การวิเคราะห์ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้า**

เนื่องจากเส้นทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าทั้ง 3 ชนิดมีหลายเส้นทาง และอัตราค่าขนส่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะทางที่ใช้ในการขนส่ง ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้วิเคราะห์หาระยะทางการที่ไกลที่สุด(Maximum Distance)ที่ใช้ในการขนส่งเถ้าทั้ง 3 ชนิดจากโรงงานอุตสาหกรรมไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระยะทางที่ใช้ในการขนส่งที่ไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการหาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่กำหนดให้ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับศูนย์(AC = 0)

$$AC = \frac{A + TC - OC}{Q}$$

$$AC = \frac{A + [NT * C] - OC}{Q}$$

$$AC = \frac{A + \left[\left(\frac{q_j}{30\,t_{Ash}/trip}\right) * \left((AP + (T * D)) * 30\,t_{Ash}/trip\right)\right] - OC}{Q}$$

$$D = \frac{\left[\frac{(AC * Q) - A + OC}{q_j}\right] - AP}{T}$$

การวิเคราะห์หาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งนี้ ใช้ในการประกอบการตัดสินใจในการเลือกรับซื้อเถ้าของโรงงานปูนซีเมนต์ เพื่อไม่ให้ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งมีผลต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจส่งผลเป็นภาระที่เกิดขึ้นกับผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ได้

3.4 **ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย**

จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นข้อมูลที่ปี พ.ศ. 2558 และเป็นข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้ชาญ ผู้ที่ทำงานในโรงงานปูนซีเมนต์ โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตไฟฟ้า และการกำหนดค่าโดยผู้ทำการศึกษา ซึ่งค่าของตัวแปรและที่มาของข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์จะแสดงอยู่ในตารางด้านล่าง

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลและที่มาของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย	**แหล่งที่มาของข้อมูล**
ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (AC)	ผลลัพธ์งานวิจัย
ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (A)	การเก็บข้อมูลและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์
ต้นทุนการดำเนินงาน (OC)	การเก็บข้อมูล
ต้นทุนรวมของเถ้า (TC)	การเก็บข้อมูลและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์
จำนวนการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดต่อปี (NT)	การเก็บข้อมูลและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์
ต้นทุนของเถ้าต่อเที่ยวการขนส่ง (C)	การเก็บข้อมูลและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์
ปริมาณเถ้าที่สามารถบรรทุกได้ต่อเที่ยว = 30 t_{Ash}/trip	การเก็บข้อมูล
ราคาของเถ้าแต่ละชนิด (AP)	การเก็บข้อมูล
อัตราค่าขนส่ง (T)	การเก็บข้อมูลและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์
ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้า (D)	การเก็บข้อมูล
ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง (Q)	ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์
ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (q)	ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์
สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (EF)	CSI Protocal

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการศึกษา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้เถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันยังเป็นเถ้าที่ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ เป็นขยะเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม และยังไม่มีแนวทางการแก้ปัญหา ทำให้เถ้าทั้งสองชนิดยังไม่มีมูลค่าหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือราคาในการซื้อขายเป็นศูนย์ ต่างจากเถ้าลอยที่มีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้มีมูลค่าในการซื้อขาย หากในอนาคตมีการผลักดันให้เกิดนโยบายการนำเถ้าชานอ้อยหรือเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด ก็จะส่งผลให้เถ้าทั้งสองชนิดมีมูลค่าในการซื้อขายเช่นเดียวกับเถ้าลอยก็เป็นได้

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์หาต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้าทั้ง 3 ชนิดคือ เถ้าลอย เถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศไทย โดยได้ทำการแบ่งออกเป็น 3 กรณีด้วยกัน คือ

1. วิเคราะห์ที่ราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งของเถ้าทั้ง 3 ชนิด เป็นค่าในปัจจุบัน(พ.ศ. 2558)

รายการ	เถ้าลอย	เถ้าชานอ้อย	เถ้าปาล์มน้ำมัน
ราคาเถ้า (THB/ t_{Ash})	170	0	0
อัตราค่าขนส่ง (THB/ t_{Ash} /km)	3.15	3.15	3.15

2. วิเคราะห์ที่อัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันเทียบเท่ากันกับของเถ้าลอย เมื่อมีการผลักดันให้ใช้งานจึงมีมูลค่าในการซื้อขาย

รายการ	เถ้าลอย	เถ้าชานอ้อย	เถ้าปาล์มน้ำมัน
ราคาเถ้า (THB/ t_{Ash})	170	170	170
อัตราค่าขนส่ง (THB/t_{Ash}/km)	3.15	3.15	3.15

3. วิเคราะห์ที่อัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงขึ้นในอนาคต อาจเป็นผลมาจากปริมาณความต้องการใช้ที่สูงขึ้นและค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งที่สูงขึ้น

รายการ	เถ้าลอย	เถ้าชานอ้อย	เถ้าปาล์มน้ำมัน
ราคาเถ้า (THB/ t_{Ash})	270	270	270
อัตราค่าขนส่ง (THB/ t_{Ash} /km)	6	6	6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและมีผลต่อการวิเคราะห์หาต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือ ระยะทางที่ใช้ในการขนส่ง เนื่องจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่มีเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันรวมถึงโรงไฟฟ้าถ่านหินมีจำนวนมาก ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการวิเคราะห์หาระยะทางเฉลี่ยที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด โดยวิธีการถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted-Average Method) ระหว่างระยะทางที่ใช้ในการขนส่งกับกำลังการผลิตไฟฟ้าของแต่ละโรง ดังแสดงไว้ในบทที่ 3

สำหรับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากการใช้เถ้าแต่ละชนิดเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น อ้างอิงมาจากงานวิจัยการศึกษาศักยภาพการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศไทยที่ทำการศึกษาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด โดยระยะเวลาที่ทำการศึกษาคือ พ.ศ. 2558 – 2579 อ้างอิงระยะเวลาตามแผน PDP2015 [22]

ตารางที่ 7 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

ชนิดเถ้า	**ปริมาณปูนเม็ดที่ลดลง ($Mt_{clinker}$/year)**	**ปริมาณ CO2 ที่ลดลง (Mt_{CO2}/year)**
เถ้าลอย	2.629	2.17
เถ้าชานอ้อย	1.037	0.86
เถ้าปาล์มน้ำมัน	0.553	0.46

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.1.1 ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.1.1.1 กรณีที่ 1 วิเคราะห์ที่ราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งของเถ้าทั้ง 3 ชนิด เป็นค่าในปัจจุบัน(พ.ศ. 2558)

ตารางที่ 8 ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีที่ 1

รายละเอียด	หน่วย	กรณีที่ 1		
		เถ้าลอย	เถ้าชานอ้อย	เถ้าปาล์มน้ำมัน
ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (A)	**MTHB/Year**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนการดำเนินงาน (OC)	**MTHB/year**	**13,145.0**	**5,185.0**	**2,765.0**
ต้นทุนรวมของเถ้าต่อปี (TC)	**MTHB/year**	**5,481.66**	**1,252.75**	**1,275.33**
จำนวนการขนส่งเถ้าต่อปี (NT)	trip/year	87,633.33	34,566.67	18,433.33
ต้นทุนของเถ้าต่อเที่ยว (AC * 30 t_{Ash}/trip)	THB/trip	62,552.22	36,241.70	69,186.29
ต้นทุนของเถ้า (AC)=AP+(T*D)	THB/trip	2,085.07	1,208.06	2,306.21
ราคาเถ้า (AP)	THB/ton	170	0	0
ระยะที่ใช้ในการขนส่ง (D)	km	607.96	383.51	732.13
อัตราค่าขนส่ง (T)	THB/t_{Ash}/km	3.15	3.15	3.15
ปริมาณ CO_2 ที่ลดลง (Q)	**Mt_{CO2}/year**	**2.17**	**0.86**	**0.46**
ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (q)	$Mt_{Clinker}$/year	2.63	1.04	0.553
สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (EF)	$t_{CO2}/t_{Clinker}$	0.825	0.825	0.825
ต้นทุนต่อหน่วยการลดCO_2 (AC)	**THB/t_{CO2}**	**-3533.24**	**-4596.30**	**-3265.21**

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า แม้ราคาของเถ้าลอยเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันจะต่างกันมา แต่ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออไซด์ที่ได้ยังมีค่าติดลบทั้งหมด ซึ่งตามทฤษฎีแล้วนั้น หากต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ออกมามีค่าน้อยกว่าศูนย์ (AC < 0) แสดงว่า

แนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าว มีประโยชน์เกิดขึ้นมากกว่าต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงาน ทำให้ไม่ต้องการการลงทุนหรือการสนับสนุนด้านค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ถือได้ว่าเป็นแนวทางที่มีต้นทุนต่ำและคุ้มค่าแก่การนำไปปรับใช้

4.1.1.2 วิเคราะห์ที่อัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันเทียบเท่ากับของเถ้าลอย เมื่อมีการนำไปใช้งานจึงมีมูลค่าในการซื้อขาย

ตารางที่ 9 ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีที่ 2

รายละเอียด	หน่วย	กรณีที่ 2		
		เถ้าลอย	เถ้าชานอ้อย	เถ้าปาล์มน้ำมัน
ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (A)	**MTHB/Year**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนการดำเนินงาน (OC)	**MTHB/year**	**13,145.00**	**5,185.00**	**2,765.00**
ต้นทุนรวมของเถ้าต่อปี (TC)	**MTHB/year**	**5,481.66**	**1,429.04**	**1,369.34**
จำนวนการขนส่งเถ้าต่อปี (NT)	trip/year	87,633.33	34,566.67	18,433.33
ต้นทุนของเถ้าต่อเที่ยว (AC * 30 t_{Ash}/trip)	THB/trip	**62,552.22**	**41,341.70**	**74,286.29**
ต้นทุนของเถ้า (AC)=AP+(T*D)	THB/trip	2,085.07	1,378.06	2,476.21
ราคาเถ้า (AP)	THB/ton	170	170	170
ระยะที่ใช้ในการขนส่ง (D)	km	607.96	383.51	732.13
อัตราค่าขนส่ง (T)	THB/t_{Ash}/km	3.15	3.15	3.15
ปริมาณ CO_2 ที่ลดลง (Q)	**Mt_{CO2}/year**	**2.17**	**0.86**	**0.46**
ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (q)	$Mt_{Clinker}$/year	2.629	1.037	0.553
สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (EF)	$t_{CO2}/t_{Clinker}$	0.825	0.825	0.825
ต้นทุนต่อหน่วยการลดCO_2 (AC)	**THB/t_{CO2}**	**-3533.24**	**-4390.24**	**-3059.15**

ผลการวิเคราะห์จากกรณีที่ 2 แสดงให้เห็นว่า แม้เถ้าทั้ง 3 ชนิดจะมีราคาและอัตราค่าขนส่งเท่ากันแล้ว ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีค่าติดลบหรือมีค่าน้อยกว่าศูนย์

(AC < 0) แสดงว่าแนวทางดังกล่าว มีประโยชน์เกิดขึ้นมากกว่าต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงาน ทำให้ไม่ต้องการการลงทุนหรือการสนับสนุนด้านต้นทุนเพิ่มเติม ถือได้ว่าเป็นแนวทางที่คุ้มค่าแม้จะมีการเพิ่มในส่วนของอัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าแล้วก็ตาม

4.1.3 วิเคราะห์ที่อัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงขึ้นในอนาคต อาจเป็นผลมาจากปริมาณความต้องการใช้ที่สูงขึ้นและค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งที่สูงขึ้น

ตารางที่ 10 ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีที่ 3

รายละเอียด	หน่วย	กรณีที่ 3		
		เถ้าลอย	เถ้าชานอ้อย	เถ้าปาล์มน้ำมัน
ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (A)	**MTHB/Year**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนการดำเนินงาน (OC)	**MTHB/year**	**13,145.00**	**5,185.00**	**2,765.00**
ต้นทุนรวมของเถ้าต่อปี (TC)	**MTHB/year**	**10,299.79**	**2,666.19**	**2,578.52**
จำนวนการขนส่งเถ้าต่อปี (NT)	trip/year	87,633.33	34,566.67	18,433.33
ต้นทุนของเถ้าต่อเที่ยว (AC * 30 t_{Ash}/trip)	THB/trip	117,532.80	77,131.80	139,883.40
ต้นทุนของเถ้า (AC)=AP+(T*D)	THB/trip	3,917.76	2,571.06	4,662.78
ราคาเถ้า (AP)	THB/ton	270	270	270
ระยะที่ใช้ในการขนส่ง (D)	km	607.96	383.51	732.13
อัตราค่าขนส่ง (T)	THB/t_{Ash}/km	6	6	6
ปริมาณ CO_2 ที่ลดลง (Q)	**Mt_{CO2}/year**	**2.17**	**0.86**	**0.46**
ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (q)	$Mt_{Clinker}$/year	2.629	1.037	0.553
สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (EF)	$t_{CO2}/t_{Clinker}$	0.825	0.825	0.825
ต้นทุนต่อหน่วยการลดCO_2 (AC)	**THB/t_{CO2}**	**-1311.81**	**-2944.17**	**-408.75**

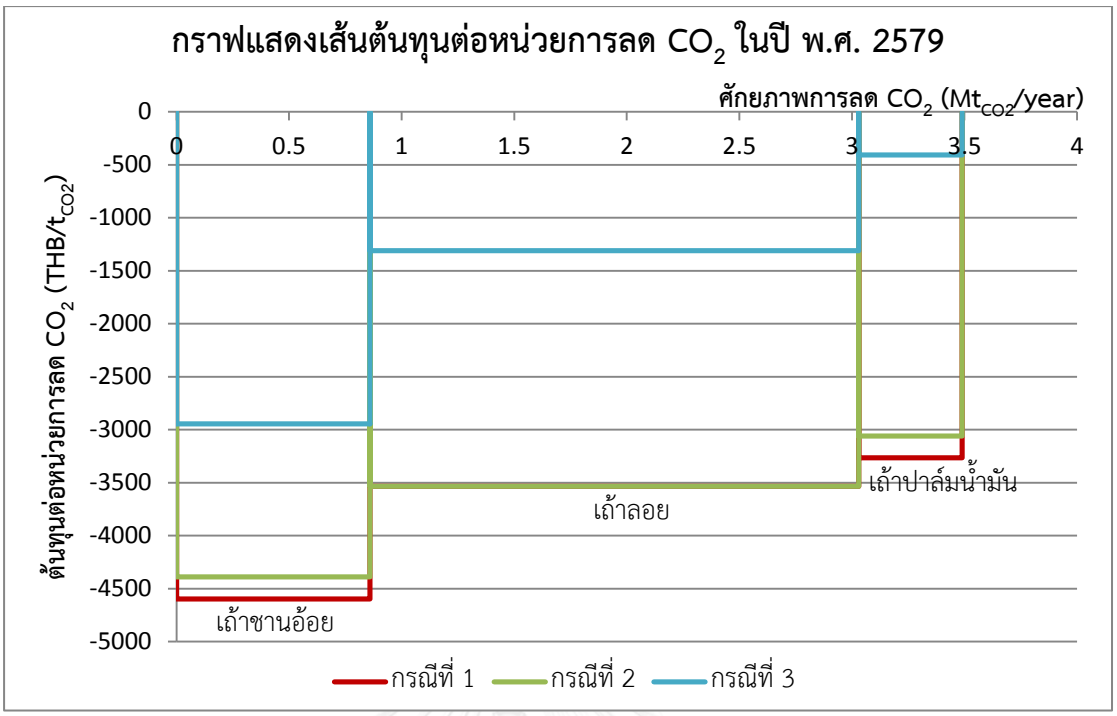
ในกรณีที่ 3 แม้ในอนาคตราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งจะเพิ่มสูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากความต้องการที่มากขึ้นจึงทำให้ราคาสูงขึ้น หรือ ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งสูงขึ้นจึงทำให้อัตราค่าขนส่งเพิ่มขึ้น แต่ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้นยังมีค่าน้อยกว่าศูนย์ (AC < 0) แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ที่เกิดขึ้นของแนวทางดังกล่าวมีมากกว่าต้นทุนที่ใช้ จึงสามารถสรุปได้ว่าแนวทางนี้คุ้มค่าและมีความเหมาะสมแก่การนำไปใช้แม้ในอนาคต จะมีปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งที่มีค่าสูงขึ้นก็ตาม

4.1.2 กราฟแสดงเส้นต้นทุนต่อหน่วยการลด CO_2

กราฟแสดงเส้นต้นทุน หรือ Abatement Cost Curve เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการอธิบายถึงต้นทุนและศักยภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละเทคโนโลยี ช่วยในการพิจารณาเลือกใช้เทคโนโลยีหรือแนวทางในการนำมาปรับใช้ โดยแนวทางที่อยู่ใต้แกน X และอยู่ทางด้านซ้ายของกราฟจะเป็นแนวทางการลดคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแนวทางที่อยู่ทางด้านขวาและอยู่เหนือแกน X เช่นเดียวกันกับแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของประเทศ เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้ผู้ศึกษาจะทำการเป็นเทียบต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากผลของงานวิจัยดังกล่าว เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแนวทางการนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



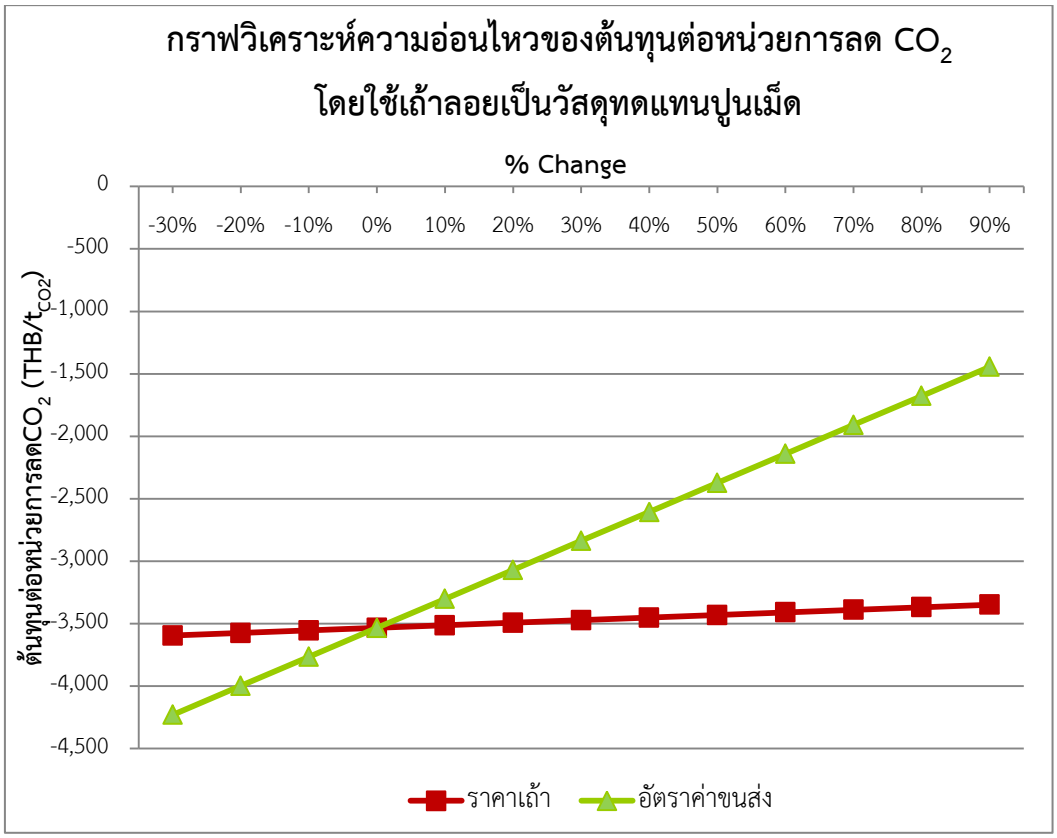
รูปที่ 18 เส้นต้นทุนการลดการปล่อย CO_2 เปรียบเทียบกับศักยภาพการลด CO_2 จากการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

จากการกราฟเส้นต้นทุนแสดงการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากทั้ง 3 กรณีต้นทุนของเถ้าทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามราคาเถ้า และอัตราค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้น แต่ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าทั้ง 3 ชนิด ยังมีค่าต่ำกว่าศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบกับศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วนั้น ถือได้ว่าเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ มีประโยชน์เกิดขึ้นมากกว่าต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงานแนวทางนั้นๆ

4.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.1 กราฟวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลต่อต้อนทุนต่อหน่วยการลด CO_2 จากการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

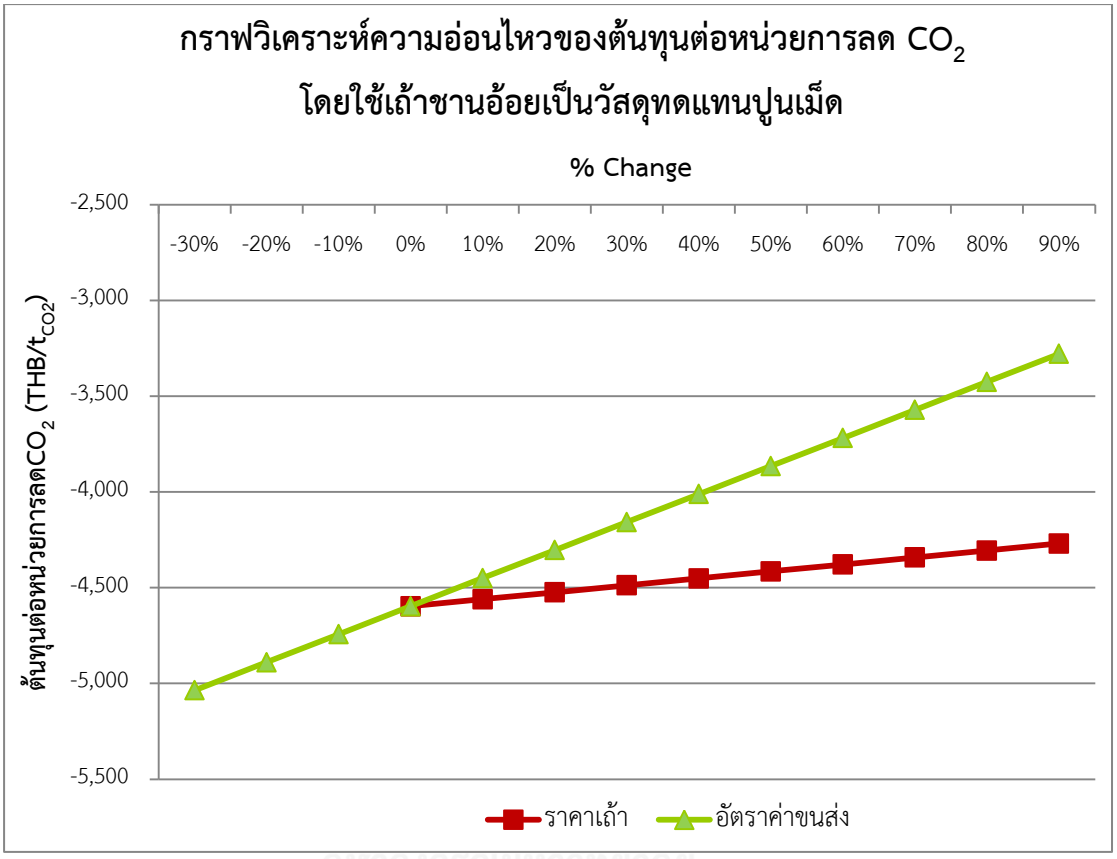
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น จะทำการวิเคราะห์ 3 ปัจจัยด้วยกันคือ อัตราดอกเบี้ยคิดลด ราคาเถ้า และอัตราค่าขนส่ง



รูปที่ 19 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าลอย

จากกราฟจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาที่สุดคืออัตราค่าขนส่ง รองลงมาเป็นราคาเถ้าและปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนเลยคือ อัตราดอกเบี้ยคิดลด แม้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าค่าของปัจจัยของอัตราค่าขนส่งเพิ่มขึ้นไปที่ 90% หรือเกือบเท่าตัวจากค่าของข้อมูลในปัจจุบัน แต่ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นยังมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หรือ มีต้นทุนอยู่ที่ -1444.07 THB/t_{CO2} ซึ่งยังถือได้ว่าคุ้มค่าแก่การนำแนวทางไปใช้

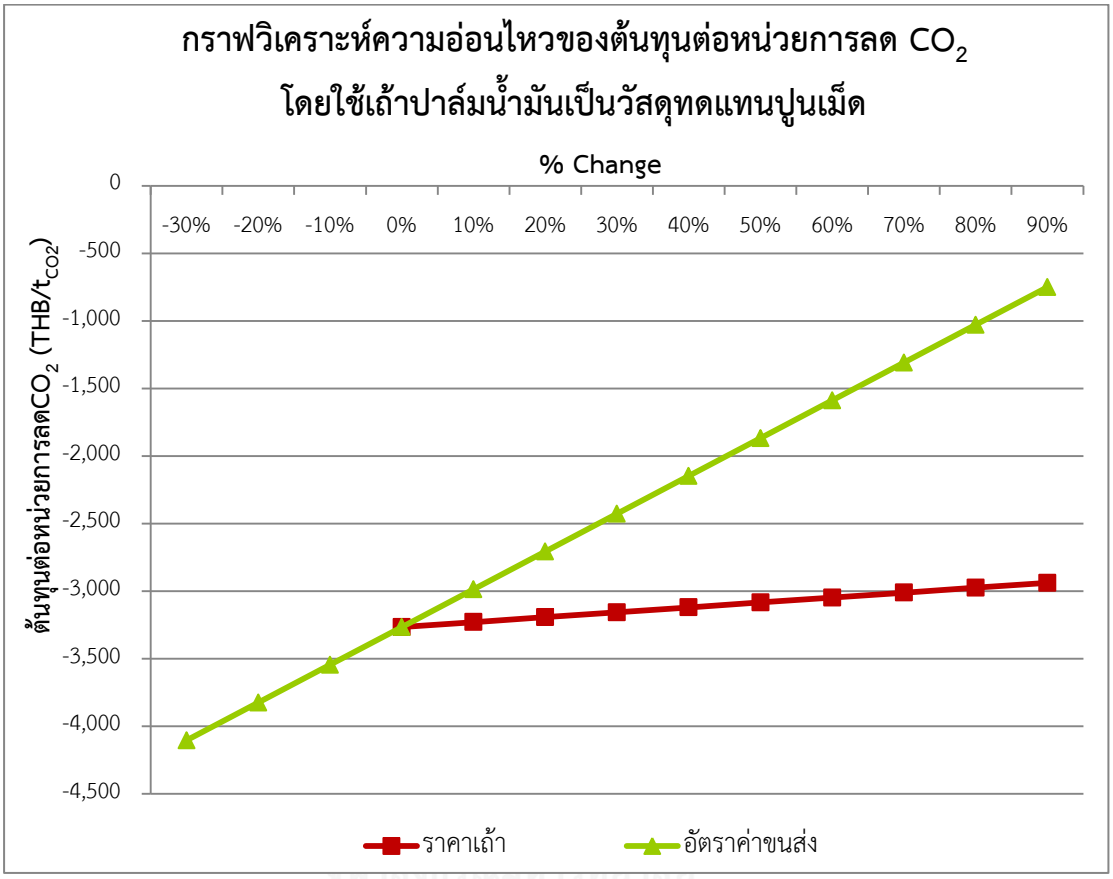
4.2.2 กราฟวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลต่อต้อนทุนต่อหน่วยการลด CO_2 จากการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด



รูปที่ 20 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าชานอ้อย

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทั้ง 3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนต่อหน่วยของการนำเถ้าชานอ้อยไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้น จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่ง เนื่องจากราคาของเถ้าชานอ้อยปัจจุบันอยู่ที่ 0 THB/ton เมื่อทำการวิเคราะห์หาต้นทุน จึงได้อ้างอิงราคาเถ้าชานอ้อยให้เท่ากับราคาของเถ้าลอย เนื่องจากเป็นเถ้าที่มีการซื้อขายกันในปัจจุบัน แต่ยังเห็นได้ชัดว่าอัตราค่าขนส่งยังคงเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เมื่ออัตราค่าขนส่งเปลี่ยนแปลงไปที่ 90% ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นไปที่ -3278.42 THB/t_{CO2}

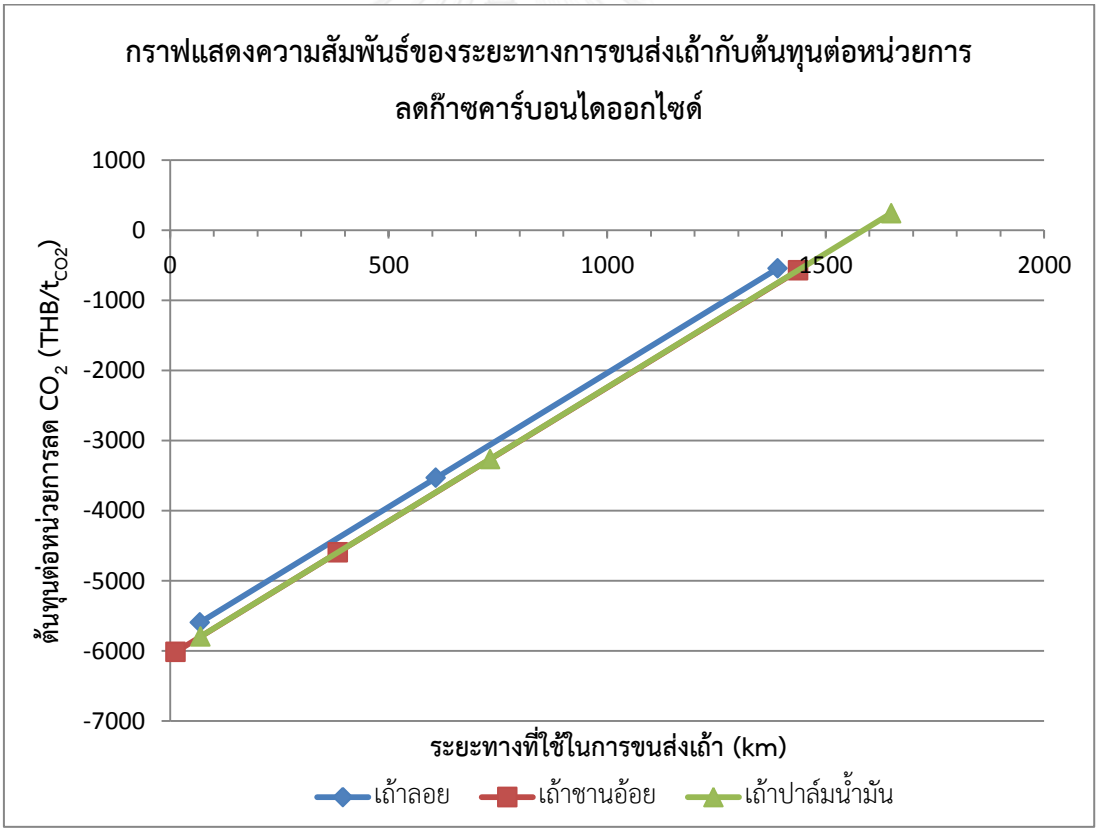
4.2.3 กราฟวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลต่อต้อนทุนต่อหน่วยการลด CO_2 จากการใช้เถ้าชานปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด



รูปที่ 21 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ผลจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด พบว่ามีผลแบบเดียวกันกับแนวทางการใช้เถ้าชานอ้อย เนื่องจากราคาของเถ้าปาล์มน้ำมันในปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 0 THB/t_{Ash} การวิเคราะห์จึงตั้งอยู่บนสมมติฐานเดียวกันกับเถ้าชานอ้อย นั่นคือการอ้างอิงราคาจากเถ้าลอยที่มีการซื้อขายกันในปัจจุบัน เห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ อัตราค่าขนส่ง เมื่ออัตราค่าขนส่งเปลี่ยนไป 90% ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ -749.34 THB/t_{CO2} แต่ค่าที่ได้ยังน้อยกว่าศูนย์ ถือได้ว่าแนวทางดังกล่าวมีความคุ้มค่าแก่การนำไปใช้

บทสรุปของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางการนำเถ้าทั้ง 3 ชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของไทย พบว่า อัตราค่าขนส่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด รองลงมาคือราคาเถ้าและปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เลย คือ อัตราดอกเบี้ยคิดลด สาเหตุที่อัตราค่าขนส่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดนั้นอาจเนื่องมากจากมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับระยะทางที่ใช้ในการขนส่ง ยิ่งระยะทางที่ใช้ในการขนส่งไกลก็ยิ่งส่งผลทำให้ต้นทุนเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้วิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยวิเคราะห์ที่ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าที่น้อยที่สุด,ระยะทางเฉลี่ยที่ใช้ในการขนส่งและระยะทางการขนส่งมากที่สุดของเถ้าแต่ละชนิด เพื่อให้ได้มาซึ่งต้นทุนต่อหน่วยที่น้อยที่สุดและมากที่สุดจะเกิดขึ้นของเถ้าแต่ละชนิด โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นข้อมูลในกรณีที่ 1 เนื่องจากเป็นค่าในปัจจุบัน



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ของระยะทางการขนส่งที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลกับต้นทุนการลด CO_2

จากกราฟจะเห็นได้ว่าระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยที่มีค่ามากที่สุดนั้นไม่ได้ทำให้ต้นทุนของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าทั้ง 2 ชนิดมีค่ามากกว่าศูนย์ ต่างจากระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันที่ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการวิเคราะห์หาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด ที่จะไม่ส่งผลทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าศูนย์ซึ่งอาจส่งผลต่อการตัดสินใจของผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ในการรับซื้อเถ้าแต่ละชนิดได้

นอกจากนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนต่อหน่วยของเถ้าทั้ง 3 ชนิด อาจเป็นผลมาจากระยะทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ หากเส้นทางการขนส่งใดที่มีระยะทางการขนส่งมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งหรือ Maximum Distance ก็จะส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้ง แต่ผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ก็ยังสามารถเลือกรับซื้อเถ้าที่ต้องการใช้งานได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินหรือโรงไฟฟ้าชีวมวลที่มีระยะทางการขนส่งน้อยกว่าระยะทางที่เหมาะสมที่ใช้ในการขนส่งของเถ้าแต่ละชนิดเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต้อต้นทุนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 การวิเคราะห์ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด

4.3.1 ระยะทางที่เหมาะสมที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 1

โดยการวิเคราะห์หาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด อ้างอิงตามข้อมูลในกรณีที่ 1 จะใช้สูตรเดียวกันกับการวิเคราะห์หาต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะกำหนดให้ต้นทุนต่อหน่วยมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 11 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 1

รายละเอียด	**หน่วย**	**กรณีที่ 1**		
		เถ้าลอย	**เถ้าชานอ้อย**	**เถ้าปาล์มน้ำมัน**
ต้นทุนต่อหน่วยการลด CO_2 (AC)	**THB/t_{CO2}**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (A)	**MTHB/Year**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนการดำเนินงาน (OC)	**MTHB/year**	**13,145.00**	**5,185.00**	**2,765.00**
ต้นทุนรวมของเถ้าต่อปี (TC)	**MTHB/year**	**5,481.66**	**1,252.75**	**1,275.33**
จำนวนการขนส่งเถ้าต่อปี (NT)	trip/year	87,633.33	34,566.67	18,433.33
ราคาเถ้า (AP)	THB/t_{Ash}	170	0	0
อัตราค่าขนส่ง (T)	THB/t_{Ash}/km	3.15	3.15	3.15
ปริมาณ CO_2 ที่ลดลง (Q)	**Mt_{CO2}/year**	**2.17**	**0.86**	**0.46**
ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (q)	$Mt_{Clinker}$/year	2.63	1.04	0.553
สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (EF)	$t_{CO2}/t_{Clinker}$	0.825	0.825	0.825
ระยะที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง (D)	**km**	**1533.33**	**1587.30**	**1587.30**

จากผลการวิเคราะห์ในตารางจะเห็นได้ว่า ระยะทางการขนส่งที่ไกลที่สุดของเถ้าแต่ชนิด มีระยะทางค่อนข้างมาก เกือบจะครอบคลุมทุกส้นทางที่ใช้ในการขนส่ง หากเถ้าชนิดใดที่มีระยะทางที่ใช้ในการขนส่งจริงที่เกินกว่าระยะทางทางในตาราง โรงงานปูนซีเมนต์ก็สามารถเลือกรับซื้อเถ้าจากโรงงานอื่นที่มีระยะทางการขนส่งที่ใกล้กว่าได้

4.3.2 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 2

โดยการวิเคราะห์หาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด อ้างอิงตามข้อมูลในกรณีที่ 2 คือที่อัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่าเท่ากัน อ้างอิงตามราคาเถ้าลอยที่มีการซื้อขายกันในปัจจุบัน ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 12 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 2

รายละเอียด	**หน่วย**	**กรณีที่ 2**		
		เถ้าลอย	**เถ้าชานอ้อย**	**เถ้าปาล์มน้ำมัน**
ต้นทุนต่อหน่วยการลด CO_2 (AC)	**THB/t_{CO2}**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (A)	**MTHB/Year**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนการดำเนินงาน (OC)	**MTHB/year**	**13,145.00**	**5,185.00**	**2,765.00**
ต้นทุนรวมของเถ้าต่อปี (TC)	**MTHB/year**	**5,481.66**	**1,429.04**	**1,369.34**
จำนวนการขนส่งเถ้าต่อปี (NT)	trip/year	87,633.33	34,566.67	18,433.33
ราคาเถ้า (AP)	THB/t_{Ash}	170	170	170
อัตราค่าขนส่ง (T)	THB/t_{Ash}/km	3.15	3.15	3.15
ปริมาณ CO_2 ที่ลดลง (Q)	**Mt_{CO2}/year**	**2.17**	**0.86**	**0.46**
ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (q)	$Mt_{Clinker}$/year	2.629	1.037	0.553
สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (EF)	$t_{CO2}/t_{Clinker}$	0.825	0.825	0.825
ระยะที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง (D)	**km**	**1533.33**	**1533.33**	**1533.33**

จากข้อมูลในกรณีที่ 2 นำมาวิเคราะห์หาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง พบว่าระยะทางดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ 1 ซึ่งแทบจะครอบคลุมทุกเส้นทางจริงที่ใช้ในการขนส่ง หากเส้นทางใดที่มีระยะทางเกินกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง โรงงานปูนซีเมนต์ก็สามารถเลือกซื้อเถ้าแต่ละชนิดจากโรงงานในพื้นที่ใกล้เคียงได้

4.3.3 ระยะทางที่เหมาะสมที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 3

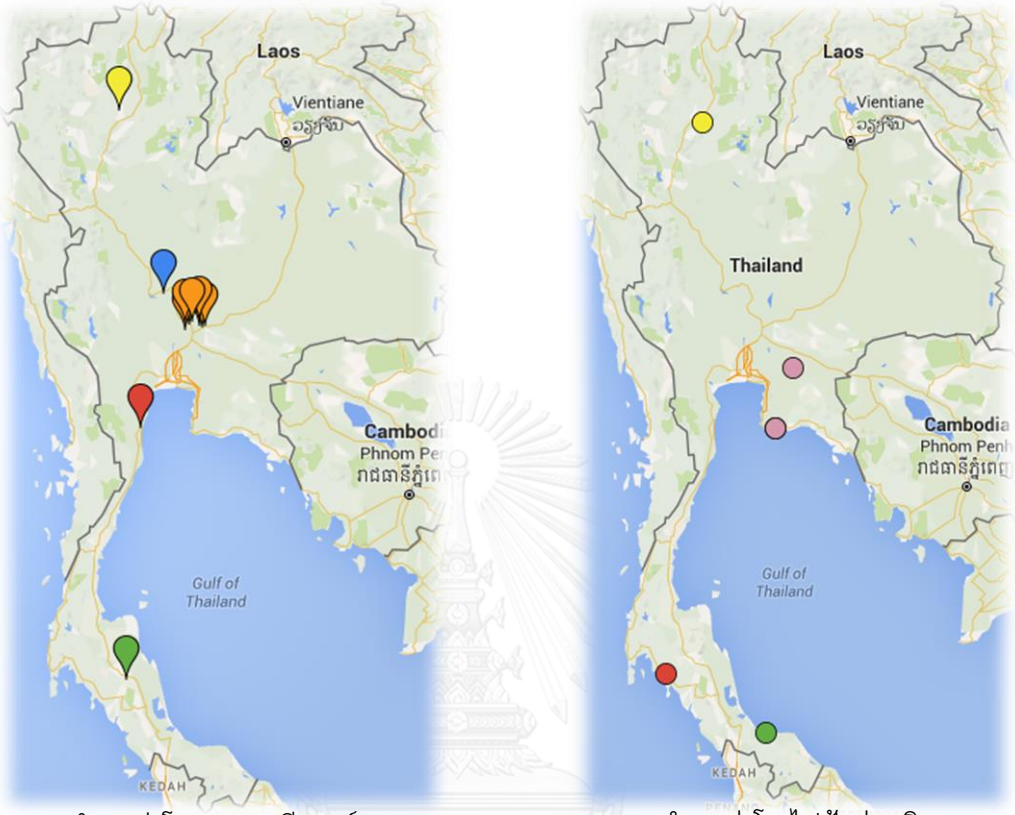
โดยการวิเคราะห์หาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด อ้างอิงตามข้อมูลในกรณีที่ 3 คือที่อัตราค่าขนส่งและราคาของเถ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นในอนาคต เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 13 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิดสำหรับกรณีที่ 3

รายละเอียด	**หน่วย**	**กรณีที่ 3**		
		เถ้าลอย	**เถ้าชานอ้อย**	**เถ้าปาล์มน้ำมัน**
ต้นทุนต่อหน่วยการลด CO_2 (AC)	**THB/t_{CO2}**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด (A)	**MTHB/Year**	**0**	**0**	**0**
ต้นทุนการดำเนินงาน (OC)	**MTHB/year**	**13,145.00**	**5,185.00**	**2,765.00**
ต้นทุนรวมของเถ้าต่อปี (TC)	**MTHB/year**	**10,299.79**	**2,666.19**	**2,578.52**
จำนวนการขนส่งเถ้าต่อปี (NT)	trip/year	87,633.33	34,566.67	18,433.33
ราคาเถ้า (AP)	THB/t_{Ash}	270	270	270
อัตราค่าขนส่ง (T)	THB/t_{Ash}/km	6	6	6
ปริมาณ CO_2 ที่ลดลง (Q)	**Mt_{CO2}/year**	**2.17**	**0.86**	**0.46**
ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง (q)	$Mt_{Clinker}$/year	2.629	1.037	0.553
สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด (EF)	$t_{CO2}/t_{Clinker}$	0.825	0.825	0.825
ระยะที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง (D)	**km**	**788.33**	**788.33**	**788.33**

ผลลัพธ์ของระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งนี้ในกรณีที่ 3 นี้ เห็นได้ชัดว่าต่างจากผลลัพธ์ในกรณีที่ 1 และ 2 มาก ส่งผลเส้นทางการขนส่งหลายเส้นทางที่ไม่สามารถใช้ได้ โดยเส้นทางที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่มากที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง(Maximum Distance) ก็จะส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ดังนั้นผู้ศึกษาจะแสดงให้เห็นถึงเส้นทางการขนส่งที่ไม่สามารถใช้ได้ของกรณีที่ 3 จะแสดงอยู่สัญลักษณ์ ▭ ดังแสดงอยู่ในรูปและตารางด้านล่าง

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอย



ตำแหน่งโรงงานปูนซีเมนต์ ตำแหน่งโรงไฟฟ้าถ่านหิน

รูปที่ 23 ตำแหน่งของโรงงานปูนซีเมนต์และโรงไฟฟ้าถ่านหินตามพื้นต่างๆ

ที่มาของข้อมูล

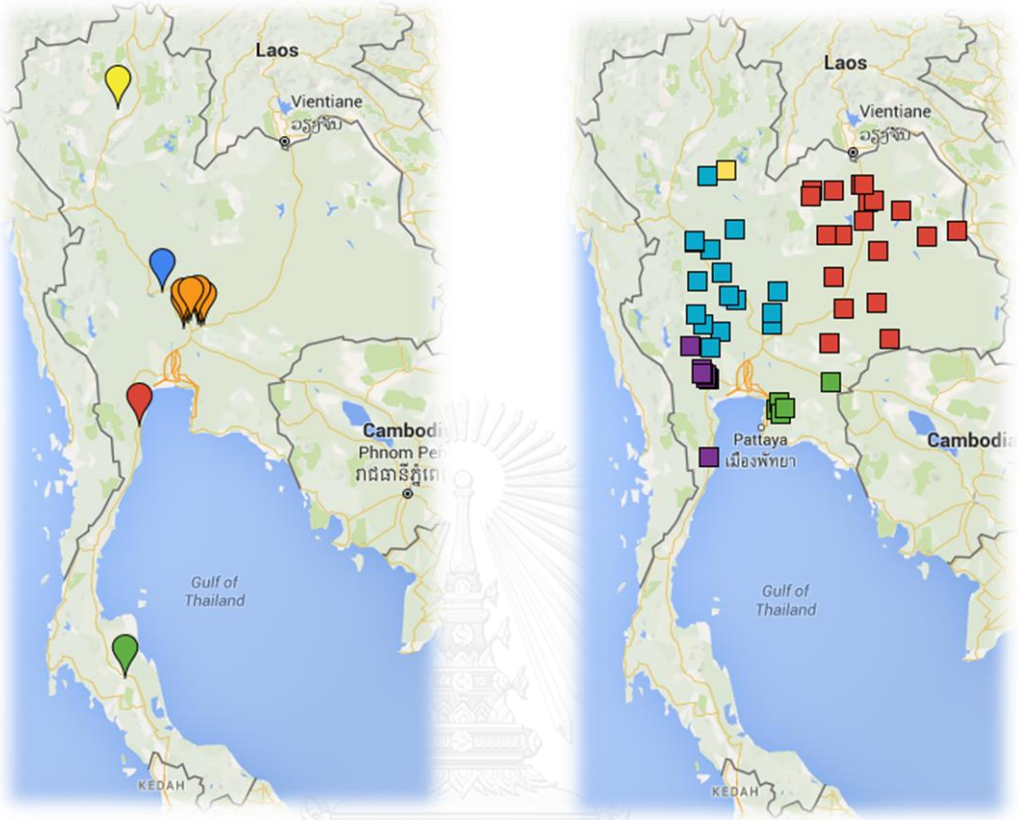
- โรงงานผลิตปูนซีเมนต์จำนวนทั้งสิ้น 12 โรง (อ้างอิงตามข้อมูล สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย)
- โรงงานผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตทั้งที่มีอยู่ในปัจจุบันและที่จะเกิดขึ้นตามแผน PDP2015 มีทั้งสิ้น 6 โรง

ตารางที่ 14 เส้นทางการขนส่งเถ้าลอยที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรม ไปยัง โรงงานปูนซีเมนต์													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
1	โรงไฟฟ้าแม่เมาะ-ลำปาง	1390	68	573	563	562	583	581	558	786	465	563	547
2	บริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด-ระยอง	952	826	270	290	284	272	274	290	348	383	289	292
3	โรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.เหนือคลอง-กระบี่	116	1418	926	928	911	927	929	920	642	993	943	929
4	โรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.เทพา - สงขลา 1-2	276	1629	1137	1139	1122	1138	1141	1139	875	1199	1155	1141
6	National Supply	889	700	130	151	149	142	145	156	292	254	163	150
7	new(2000MW) แทน BLCP	952	826	270	290	284	272	274	290	348	383	289	292

* เส้นทางการขนส่งเถ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าชีวมวล ที่มีระยะทางที่ใช้ในการขนส่งมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่ง ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่า จะแสดงอยู่ใน

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อย



ตำแหน่งโรงงานปูนซีเมนต์ ตำแหน่งโรงไฟฟ้าชีวมวล

รูปที่ 24 ตำแหน่งของโรงงานปูนซีเมนต์และโรงไฟฟ้าชีวมวลของเถ้าชานอ้อยตามพื้นต่างๆ

ที่มาของข้อมูล

- โรงงานผลิตปูนซีเมนต์จำนวนทั้งสิ้น 12 โรง (อ้างอิงตามข้อมูล สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย)
- โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตจำนวนทั้งสิ้น 51 โรง(อ้างอิงข้อมูลตามคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล)

ตารางที่ 15 เส้นทางการขนส่งเถ้าชานอ้อยที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3 (1/3)

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรม ไปยัง โรงงานปูนซีเมนต์													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
1	โรงงานน้ำตาลไทยเอกลักษณ์ (อุตรดิตถ์)	1260	171	417	411	410	433	435	401	664	316	402	389
2	บริษัท สหเรือง จำกัด	1437	817	548	585	591	542	544	593	908	611	556	574
3	โรงงานน้ำตาลมิตรกาฬสินธุ์	1351	779	460	495	508	454	456	504	779	526	468	488
4	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลอีสาน (กาฬสินธุ์)	1339	647	464	478	516	458	461	487	802	507	467	472
5	โรงงานน้ำตาลขอนแก่น	1256	682	375	389	402	371	371	398	716	418	374	384
6	โรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง (ขอนแก่น)	1204	531	323	329	341	321	322	339	666	365	315	324
7	โรงงานรวมเกษตรกรอุตสาหกรรม (ชัยภูมิ)	1198	564	320	324	335	316	317	333	636	334	449	319
8	โรงงานน้ำตาลวังขนาย (มหาวัง-มหาสารคาม)	1235	694	360	380	393	354	356	389	706	411	362	374
9	โรงงานน้ำตาลเกษตรผล (อุดรธานี)	1293	686	412	426	440	408	408	435	753	473	411	421
10	โรงงานน้ำตาลกุมภวาปี (อุดรธานี)	1305	693	424	438	451	449	420	447	765	485	423	433
11	โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริมอุดม (อุดรธานี)	1372	642	454	465	496	445	451	474	790	479	453	469
12	โรงงานน้ำตาลเอราวัณ (หนองบัวลำภู)	1314	471	434	437	471	430	445	454	718	443	424	429
13	โรงงานน้ำตาลไทยกาญจนบุรี (อุดรธานี)	1336	593	452	470	482	446	475	525	740	496	451	466
14	โรงงานน้ำตาลขอนแก่น (วังสะพุง)	1296	425	415	418	438	426	413	427	700	401	410	409
15	โรงงานรวมเกษตรกรมิตรภูหลวง (เลย)	1293	430	408	410	433	419	405	421	697	394	402	402
16	โรงงานน้ำตาลบุรีรัมย์	1176	792	315	328	353	309	312	336	587	378	306	326

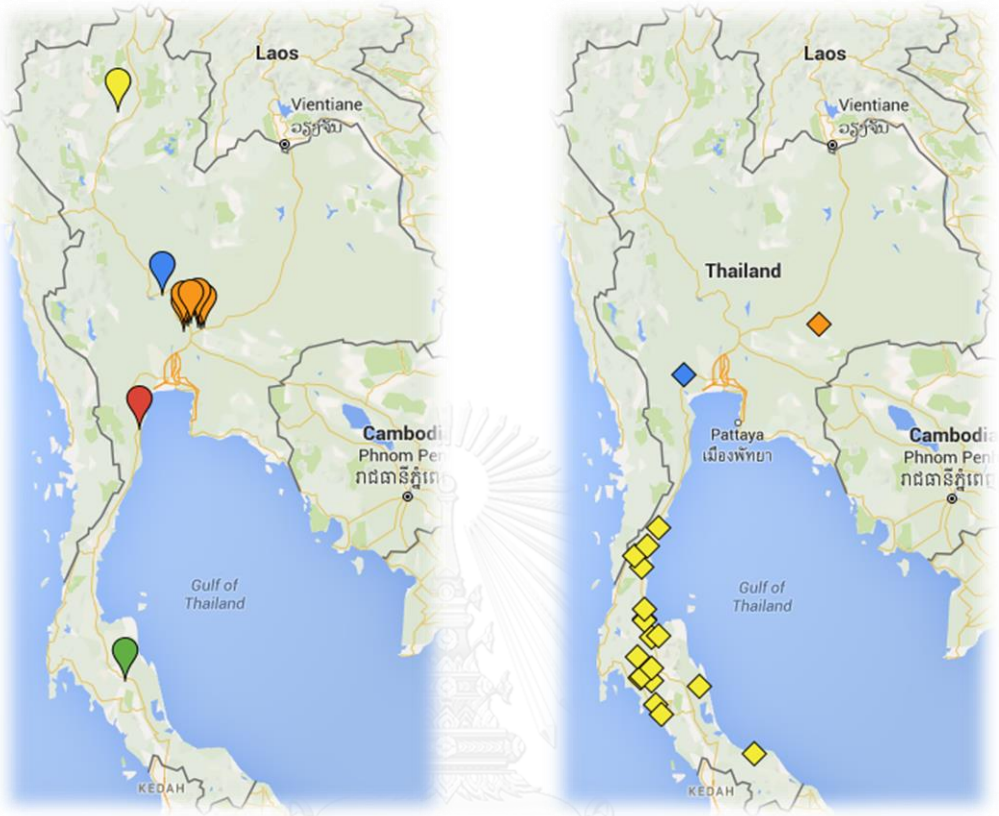
ตารางที่ 15 เส้นทางการขนส่งเถ้าชานอ้อยที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3 (2/3)

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรม ไปยัง โรงงานปูนซีเมนต์ II													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
17	โรงงานอุตสาหกรรมโคราช (นครราชสีมา)	1078	693	200	232	244	194	197	246	482	310	209	285
18	โรงงานอุตสาหกรรมอ่างเวียน (นครราชสีมา)	1136	634	244	259	280	240	241	269	540	285	234	254
19	โรงงานน้ำตาลครบุรี (นครราชสีมา)	1064	722	174	209	228	168	170	226	468	295	184	217
20	โรงงานน้ำตาลสุรินทร์ (สุรินทร์)	1167	823	317	354	355	272	274	357	571	385	327	347
21	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลสุพรรณบุรี(สุพรรณบุรี)	882	539	132	111	99	139	141	104	277	105	132	118
22	บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด (สุพรรณบุรี)	886	553	177	146	138	183	185	138	312	124	171	153
23	โรงงานน้ำตาลรีไฟน์ชัยมงคล (อู่ทอง-สุพรรณบุรี)	818	588	156	140	122	159	161	133	254	149	166	147
24	โรงงานน้ำตาลสิงห์บุรี (สิงห์บุรี)	977	474	141	120	124	157	159	113	373	12	130	119
25	โรงงานน้ำตาลสระบุรี (สระบุรี)	934	565	41	41	62	53	46	53	350	125	21	33
26	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ที.เอ็น. (ลพบุรี)	961	557	73	74	90	76	70	77	376	110	55	65
27	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ (อุทัยธานี)	902	509	198	175	169	212	220	167	305	127	200	187
28	โรงงานน้ำตาลทิพย์กำแพงเพชร (กำแพงเพชร)	1091	353	297	242	259	313	301	251	495	175	282	246
29	โรงงานน้ำตาลทิพย์สุโขทัย (สุโขทัย)	1279	182	446	450	420	488	479	411	683	337	439	447
30	โรงงานน้ำตาลพิษณุโลก (พิษณุโลก)	1123	326	285	267	274	304	307	364	527	189	277	270
31	โรงงานน้ำตาลทรายกำแพงเพชร (กำแพงเพชร)	1106	318	300	257	286	295	343	278	509	189	290	260
32	โรงงานน้ำตาลนครเพชร (กำแพงเพชร)	1110	314	304	282	289	299	345	280	513	192	287	264
33	โรงงานรวมผลอุตสาหกรรมนครสวรรค์ (นครสวรรค์)	1021	398	221	172	186	226	231	173	425	95	199	175
34	โรงงานเกษตรไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล (นครสวรรค์)	976	461	156	133	128	189	191	127	380	35	152	138
35	โรงงานไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม (เพชรบูรณ์)	1007	532	123	125	136	134	117	135	410	130	113	118

ตารางที่ 15 เส้นทางการขนส่งเถ้าชานอ้อยที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3 (3/3)

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรม ไปยัง โรงงานปูนซีเมนต์													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
36	โรงงานอุตสาหกรรมมิตรเกษตร (อุทัยธานี)	998	440	232	209	209	245	252	196	419	119	235	210
37	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลชลบุรี (ชลบุรี)	860	742	197	213	210	199	202	220	264	295	214	204
38	โรงงานน้ำตาลนิวกว้างสุ้นหลี (ชลบุรี)	862	738	187	196	196	190	192	204	266	288	205	198
39	โรงงานสหการน้ำตาลชลบุรี (ชลบุรี)	874	772	214	228	228	217	219	225	285	306	231	217
40	โรงงานน้ำตาลและอ้อยตะวันออก (สระแก้ว)	968	790	215	264	266	215	217	272	391	308	230	266
41	โรงงานน้ำตาลระยอง (ชลบุรี)	881	759	211	219	225	214	216	232	292	305	229	220
42	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลปราณบุรี (ประจวบคีรีขันธ์)	553	844	344	369	347	347	349	350	54	405	375	348
43	โรงงานน้ำตาลราชบุรี (ราชบุรี)	738	673	195	195	183	198	200	193	142	231	214	199
44	โรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง (ราชบุรี)	742	668	197	195	749	200	202	191	146	228	214	199
45	โรงงานอุตสาหกรรมมิตรเกษตร (กาญจนบุรี)	746	647	205	197	179	201	203	188	157	223	217	201
46	โรงงานน้ำตาลไทยกาญจนบุรี (กาญจนบุรี)	749	645	205	189	175	201	203	183	159	223	217	201
47	โรงงานน้ำตาลนิวกรุงไทย (กาญจนบุรี)	835	606	223	197	184	224	226	191	237	194	219	303
48	โรงงานไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล (กาญจนบุรี)	765	647	202	184	169	205	207	175	188	205	212	191
49	โรงงานน้ำตาลท่ามะกา (กาญจนบุรี)	754	655	206	188	173	209	211	180	177	213	218	203
50	โรงงานประจวบอุตสาหกรรม (กาญจนบุรี)	755	655	206	188	218	209	212	180	178	214	219	203
51	โรงงานไทยเพิ่มพูนอุตสาหกรรมม (กาญจนบุรี)	761	657	210	189	175	212	215	182	166	215	213	195

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมัน



ตำแหน่งโรงงานปูนซีเมนต์ ตำแหน่งโรงไฟฟ้าชีวมวล

รูปที่ *25 ตำแหน่งของโรงงานปูนซีเมนต์และโรงไฟฟ้าชีวมวลของเถ้าปาล์มน้ำมันตามพื้นต่างๆ*

ที่มาของข้อมูล

- โรงงานผลิตปูนซีเมนต์จำนวนทั้งสิ้น 12 โรง (อ้างอิงตามข้อมูล สภาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย)
- โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้กากปาล์มเช่น กะลาปาล์มและทะลายปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จำนวน 20 โรง (อ้างอิงข้อมูลตามสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน))

ตารางที่ 16 เส้นทางการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีระยะทางมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งจากข้อมูลในกรณีที่ 3

ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงไฟฟ้าชีวมวล/โรงงานอุตสาหกรรม ไปยัง โรงงานปูนซีเมนต์													
ลำดับ	บริษัท / บุคคล	SCG ทุ่งสง	SCG ลำปาง	SCG แก่งคอย	SCG เขาวง	SCG ท่าหลวง	SCCC สระบุรี	TPI สระบุรี	ACC สระบุรี	JCC เพชรบุรี	JCC นครสวรรค์	TPCC สระบุรี	CEMAX สระบุรี
1	บริษัท สุราษฎร์ธานี กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด	142	1277	787	783	766	783	786	775	492	833	798	784
2	บจก.กรีน เพาเวอร์ สเตชั่น (2552) (สุราษฎร์ธานี)	366	1224	731	733	716	734	736	725	442	783	748	734
3	บจก.กลุ่มปาล์มธรรมชาติ (ชุมพร)	284	1224	614	617	600	617	620	609	326	667	632	645
4	บจก.เจริญน้ำมันปาล์ม (ชุมพร)	333	1118	609	611	594	612	614	604	321	661	627	640
5	บจก.ทรัพย์อนันต์ไบโอแมส (โครงการ1) (ชุมพร)	335	1071	567	569	552	570	562	572	279	619	585	598
6	บริษัท ท่าฉางสวนปาล์มน้ำมันอุตสาหกรรม จำกัด (สุราษฎร์ธ	166	1233	733	736	719	736	738	728	445	785	751	737
7	บจก.พีดีไอ สุราษฎ์ไบโอแมส (สุราษฎร์ธานี)	230	1202	708	710	693	711	713	703	420	760	726	731
8	บจก.แสงศิริอุตสาหกรรมเกษตร (สุราษฎร์ธานี)	145	1292	799	801	784	802	804	793	510	851	816	821
9	บจก. บจก.เอเอสทีปาล์มออยล์ (ประจวบคีรีขันธ์)	385	1025	522	524	507	525	527	516	233	574	539	552
10	บริษัท ซาราฟเอ็นเนอร์ยี จำกัด (กระบี่)	107	1385	886	888	871	889	891	880	597	938	903	889
11	บจก.ปาล์มพัฒนาไบโอแมส (ปัตตานี)	594	1650	1157	1159	1142	1160	1162	1152	868	1209	1174	1180
12	บจก.ศรีไสวคลีนพาวเวอร์ จำกัด (กระบี่)	69.8	1370	876	878	861	879	881	871	588	937	894	899
13	บจก.โอทาโก้ จำกัด (ตรัง)	74	1467	973	975	958	976	978	968	684	1027	978	996
14	บมจ.สหอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (กระบี่)	93	1378	884	886	869	887	889	879	595	945	902	907
15	บจก.ไทยทาโลว์ แอนด์ ออยล์ (โครงการ 3)	78.2	1461	969	963	949	972	974	958	667	1020	986	968
16	บริษัท ตรัง ไบโอเอเนอร์ยี จำกัด (ตรัง)	90.6	1465	973.5	973	958.5	976.5	978.5	967.5	677	1030.3	996	978
17	บริษัท ไฟฟ้าธรรมชาติ จำกัด (สุราษฎร์)	76.1	1350	857	851.5	837	860	862	846	556	908.7	875	856.5
18	บริษัท เอส เค เพาเวอร์พลัส (สุราษฎร์)	137	1328	841	835	820.5	844	846	830	540	892.7	858.5	840.5
19	บจก.บ้านโป่ง คลีน เอ็นเนอร์ยี (ราชบุรี)	741	679	199	199	187	202	221	195	145	234	226	208
20	บจก. เค บี วัน (นครราชสีมา)	1064	720	200	218	228	166	168	227	473	293	209	210

จากผลลัพธ์ที่ได้นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของผู้ประกอบการโรงงานปูนซีเมนต์ในการเลือกรับซื้อเถ้าแต่ละชนิด โดยใช้ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเป็นตัววัดที่จะไม่ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากเกินกว่าศูนย์ เมื่อต้นทุนต่อหน่วยมีค่าเกินกว่าศูนย์นั้น แสดงให้เห็นว่าแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ เพราะอาจส่งผลให้เกิดภาระกับผู้ประกอบการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การศึกษาเส้นต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการนำเถ้าที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นหนึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เถ้าที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วยเถ้าลอย เถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมัน ระยะเวลาที่ทำการศึกษาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2558 จนถึงปี พ.ศ. 2579 เนื่องจากแนวทางดังกล่าวเป็นแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องจักรใหม่และไม่ต้องการการลงทุนเพิ่มเติมสำหรับกระบวนการบดเถ้าเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เพราะสามารถนำเถ้าไปผสมกับปูนเม็ดก่อนขั้นตอนการบดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ในส่วนของราคาเถ้าและค่าขนส่งจากโรงงาน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางการนำเถ้าเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดของเถ้าทั้ง 3 ชนิด โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีด้วยกันคือ

กรณีที่ 1 ราคาเถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน รวมถึงอัตราค่าขนส่ง อ้างอิงตามข้อมูลในปี พ.ศ. 2558

กรณีที่ 2 อัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าชานอ้อยและราคาเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าเท่ากับราคาเถ้าลอย อ้างอิงตามข้อมูลของราคาเถ้าลอยในปี พ.ศ.2558

กรณีที่ 3 อัตราค่าขนส่งและราคาเถ้าในอนาคตมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากการซื้อขายเพิ่มสูงขึ้นและราคาค่าเชื้อเพลิงในการขนส่งมีค่าสูงขึ้น

พบว่าต้นทุนในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้ง 3 กรณีเป็นแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต้นทุนต่ำ ถือได้ว่าเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงไปได้จากการนำเถ้าทั้ง 3 ชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด โดยเถ้าที่มีต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด คือ เถ้าชานอ้อย เถ้าลอยและเถ้าปาล์มน้ำมันตามลำดับ

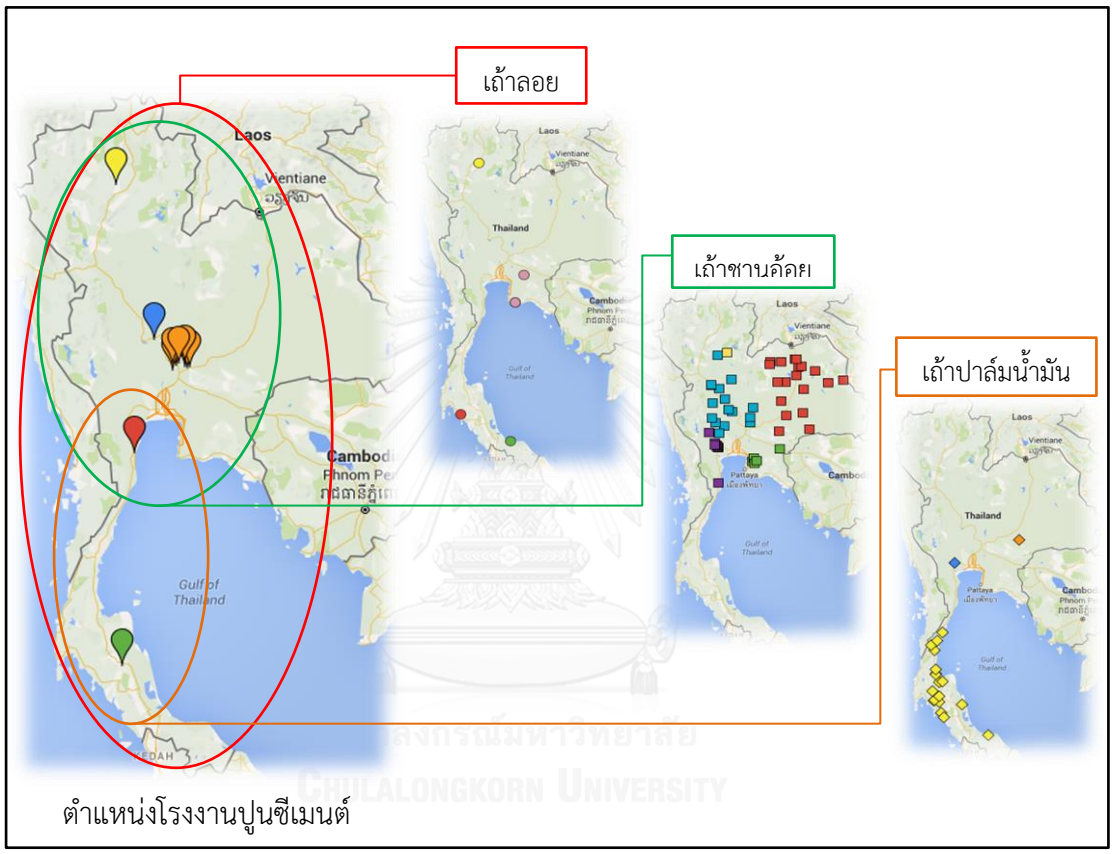
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การวิเคราะห์หาปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางนี้มากที่สุด อัตราค่าขนส่ง ปัจจัยที่ส่งผลรองลงมาคือค่าราคาเถ้า เนื่องจากอัตราค่าขนส่งมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับระยะทางที่ใช้ในการขนส่ง ในการวิเคราะห์แม้จะกำหนดให้ราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งเพิ่มสูงขึ้นไปเกือบเท่าตัวจากค่าในปีปัจจุบัน แต่ต้นทุนในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นยังมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ชี้ให้เห็นว่าแนวทางดังกล่าวมีความคุ้มค่าที่จะนำไปใช้

ในการวิเคราะห์หาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้ระยะทางเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักกับกำลังการผลิตไฟฟ้าของแต่ละโรงไฟฟ้าที่มีเถ้าเป็นวัสดุเหลือทิ้ง เมื่อวิเคราะห์หาต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งที่มากที่สุดของเถ้าทั้ง 3 ชนิด พบว่า เส้นทางการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันบางเส้นทางมีระยะทางที่ใช้ในการขนส่งที่ไกล ส่งผลให้ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้วิเคราะห์หาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าของทั้ง 3 กรณี ที่จะไม่ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าศูนย์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจสำหรับโรงงานปูนซีเมนต์ในการเลือกรับซื้อเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตไฟฟ้า ผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการกำหนดระยะทางจริงที่ใช้ในการขนส่งเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 โดยส่วนใหญ่แล้วมีค่าน้อยกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งที่จะไม่ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยมีค่ามากกว่าศูนย์ จะมีบางเส้นทางการขนส่งที่มีค่าเกินกว่าระยะทางที่เหมาะสมที่ใช้ในการขนส่ง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม โรงงานปูนซีเมนต์ก็ยังสามารถเลือกรับซื้อเถ้าจากโรงงานในพื้นที่ที่มีระยะทางการขนส่งที่ไม่เกินไปกว่าระยะทางที่เหมาะสมที่ใช้ในการขนส่งของแต่ละกรณีได้ แต่ผลลัพธ์ของระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งของกรณีที่ 3 นั้นมีค่าน้อยกว่าผลลัพธ์ในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 อยู่กว่าครึ่ง ทำให้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ใช้ในการขนส่งของเถ้าทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่ามีหลายเส้นทางที่มีระยะทางจริงที่ใช้ในการขนส่งมากกว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งของกรณีที่ 3

หากในอนาคตมีการนำเถ้าทั้ง 3 ชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด และราคาเถ้ารวมถึงอัตราค่าขนส่งมีค่าสูงขึ้น อาจจะต้องมีการจัดโซนพื้นที่ของการนำเถ้าแต่ละชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด เช่น โรงงานปูนซีเมนต์บริเวณภาคเหนือบริเวณจังหวัดลำปางและภาคกลางบริเวณจังหวัดสระบุรี สามารถผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนปูเม็ดได้ เนื่องจากระยะทางการขนส่งจะไม่ส่งผลต่อต้นทุนมากนัก แต่หากนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าปาล์มน้ำมันจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่างจากโรงงานปูนซีเมนต์ที่อยู่ในภาคตะวันตกบริเวณจังหวัดเพชรบุรีและโรงงาน

ปูนซีเมนต์ที่อยู่ในภาคใต้บริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราช จะเหมาะแก่การนำเถ้าลอย(ที่จะเกิดขึ้นตามเป้าหมายการสร้างโรงไฟฟ้าถ่านหินตามแผน PDP2015)และเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นพืชเกษตรของภาคใต้ นำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด ที่ระยะทางการขนส่งไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่หากนำเถ้าชานอ้อยไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดแล้วนั้น ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าชานอ้อยจะส่งผลกระทบต่อโรงงานปูนซีเมนต์จังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นอย่างมาก



รูปที่ 26 การจัดโซนพื้นที่ของโรงงานปูนซีเมนต์ในการนำเถ้าแต่ละชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดนั้นเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งศักยภาพปริมาณของเถ้าที่จะนำมาไปใช้ก็มีศักยภาพสูง รวมถึงยังมีงานวิจัยการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดรับรองว่าสามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อมองในด้านต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุน พบว่าเป็นแนวทางที่มีต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ และแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของราคาเถ้าและอัตราค่าขนส่งไปก็ส่งผลกระทบต่อต้นทุนเพียงเล็กน้อย ฉะนั้น

ปัญหาของการนำไปใช้คือ การสร้างความน่าเชื่อถือให้กับผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ที่มีเถ้าเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด เพื่อให้ผู้บริโภคหันมาใช้งาน ดังนั้นข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแนวทางการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด จะเป็นข้อเสนอแนะที่ไม่ใช้ด้านการเงินหรือการสร้างแรงจูงใจในการลงทุนในแนวทางนี้ เนื่องจากเป็นแนวทางที่มีต้นทุนต่ำ แต่เป็นข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการสร้างความน่าเชื่อถือและสร้างมาตรฐานให้กับผลิตภัณฑ์ ควรมีนโยบายในการส่งเสริมความเชื่อมั่นของผู้บริโภค เร่งให้มีการสร้าง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) Thailand Industrial Standards (TIS) ให้กับผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ หรือนำผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ที่ใช้เถ้าชานอ้อยหรือเถ้าปาล์มน้ำมันไปสร้างเป็นสิ่งก่อสร้าง เพื่อให้ผู้บริโภคเห็นว่าสามารถใช้งานได้จริง ซึ่งการสร้างแรงจูงใจให้กูผู้บริโภคนั้นเป็นเรื่องที่ต้องใช้เวลา หากมีการนำเสนอให้มีนโยบายการนำเถ้าแต่ละชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดแล้วนั้น ควรให้ความสำคัญในการสร้างความน่าเชื่อถือต่อผลิตภัณฑ์ใจให้กับผู้บริโภคด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม

จากการวิเคราะห์ต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการนำเถ้าไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด รวมถึงศักยภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแนวทางดังกล่าว พบว่าแนวทางการนำเถ้าลอย เถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมัน ไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างต้นทุนและปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง หากมีการนำเถ้าทั้ง 3 ชนิดไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ดแล้ว พบว่ายังมีศักยภาพเหลือพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นเพื่อช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หากมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นแล้วจะเกิดต้นทุนในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์นั้นเท่าไหร่ เพื่อช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังเป็นแนวทางช่วยกำจัดเถ้าที่ยังเป็นขยะเหลือทิ้งอยู่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

1. โครงการพัฒนาความรู้และยุทธศาสตร์ความตกลงพหุภาคีด้านสิ่งแวดล้อม. โครงการ การพัฒนาวิธีการประเมินความรับผิดชอบร่วมในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมระหว่างประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา. 2010 [cited 2015; Available from: http://www.measwatch.org/sites/default/files/bookfile/MonJanuary2010-22-25-7-Chap3_0.pdf.
2. IEA, W.C., *Cement Technology Roadmap 2009 Carbon emissions reductions up to 2050*. 15 Cedex Fédération, Paris France 75739.
3. ศาสตราจารย์ ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล and ด.ว. ตั้งจิรภัทร, การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต. 2555. **2**.
4. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, แผนกำลังผลิตไฟฟ้าของไทย พ.ศ.*2558 - 2579(PDP2015).* 2558: p. 2-3 - 2-5.
5. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. *2558 - 2579 (AEDP 2015).* 2558: p. 12 - 15.
6. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, รายงานสรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมประจำปี *2558* และแนวโน้มปี *2559.* 2558: p. 139 - 147.
7. นิยมรัตน์, ผ.ด.ฤ., *Ceramic Technology.* p. 56-63.
8. เหมืองแม่เมาะ. การใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรม. Available from: http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/coal_using.html.
9. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ Available from: http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=24&chap=6&page=t24-6-infodetail03.html.
10. ศาสตราจารย์ ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม: วัสดุปอซโซลานที่ดีสำหรับงานคอนกรีต. 2015, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
11. McKinsey & Co, P.t.a.L.-C.E. *Technologies and Practices for Climate Stabilization Transition Plan*. 2009.
12. Ali Hasanbeigi, Christoph Menke, and L. Price, *The CO2 abatement cost curve for the Thailand cement industry.* journal of Cleaner Production, 2010: p. 1509-11518.

13. O. Kiuila and T.F. Rutherford, *The cost of reducing CO2 emissions: Integrating abatement technologies into economic modeling.* Ecological Economics, 2013: p. 62-71.
14. Ali Hasanbeigi, ChristophMenke, and A. Therdyothin, *The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis : The case study of Thai cement industry.* Energy Policy, 2010: p. 392 – 405.
15. Jean-Christian Brunke and M. Blesl, *Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs.* journal of Cleaner Production, 2014: p. 94-111.
16. Yang Xi, Teng Fei, and W. Gehua, *Quantifying co-benefit potentials in the Chinese cement sector during 12th Five Year Plan: an analysis based on marginal abatement cost with monetized environmental effect.* journal of Cleaner Production, 2013: p. 102 - 111.
17. อดิศร์ อิศรางกูร ณ อยุธยา, et al., การใช้เครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสาหรับประเทศไทย. สานักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2010.
18. Company, M., *Pathways to a Low-Carbon Economy Version 2*. 2009. p. 76 - 77.
19. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ก. การใช้เถ้าลอยในคอนกรีต. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_suc_ash.html.
20. โรงไฟฟ้าแม่เมาะ. การจำหน่ายและส่งมอบเถ้าลอยและโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. Available from: http://maemoh.egat.com/index_maemoh/index.php?content=sara&topic=2.
21. ขำญาติ, จ. วิจัยเถ้าลอยฯ ประโยชน์สู่ภาคอุตสาหกรรม. เทคโนโลยีไทย; Available from: http://www.technologymedia.co.th/articledetail.asp?arid=539&pid=74.
22. สายรัตนทองคำ, ว. and ด.ว. หวังจิรนิรันดร์, ศักยภาพการใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศไทย. 2559(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
23. (CSI), W.B.C.f.S.D.W.C.S.I. *CO_2 and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry Protocol Guidance Document*. 2012 [cited 2015 March]; 3:[Available from: http://www.cement-co2-protocol.org/en/.

ภาคผนวก ก
รายชื่อโรงงานที่ใช้เป็นข้อมูลในงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1 โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ตามภาคต่างๆในไทยจำนวนทั้งสิ้น 12 โรง

ลำดับ	รายการ	ชื่อย่อที่ใช้ในงานวิจัย
1	บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด-นครศรีธรรมราช	SCG-ทุ่งสง
2	บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (ลำปาง) จำกัด	SCG-ลำปาง
3	บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย(แก่งคอย)จำกัด-สระบุรี	SCG-แก่งคอย
4	บริษัทปูนซิเมนต์ไทย (เขาวง) จำกัด-สระบุรี	SCG-เขาวง
5	บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัด-สระบุรี	SCG-ท่าหลวง
6	บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)-สระบุรี	SCCC-สระบุรี
7	บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)-สระบุรี	TPI-สระบุรี
8	บริษัท ปูนซีเมนต์เอเซีย จำกัด (มหาชน)-สระบุรี	ACC-สระบุรี
9	บริษัท ชลประทานซีเมนต์ จำกัด โรงงานชะอำ-เพชรบุรี	JCC-เพชรบุรี
10	บริษัท ชลประทานซีเมนต์ จำกัด โรงงานตาคลี-นครสวรรค์	JCC-นครสวรรค์
11	บริษัท ภูมิใจไทยซีเมนต์ จำกัด-สระบุรี	TPCC-สระบุรี
12	บริษัท เซเม็กซ์(ประเทศไทย) จำกัด-สระบุรี	CEMAX-สระบุรี

ตารางที่ 2 โรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีในปัจจุบันและที่จะเกิดตามแผน PDP2015

ลำดับ	รายการ	กำลังการผลิต(MW)
1	โรงไฟฟ้าแม่เมาะ-ลำปาง	2625
2	บริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด-ระยอง	1434
3	โรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.เหนือคลอง-กระบี่	800
4	โรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.เทพา - สงขลา	1000
5	โรงไฟฟ้าเนชั่นแนลซัพพลาย*	540
6	โรงไฟฟ้าใหม่**	556

*โรงไฟฟ้าเนชั่นแนลซัพพลาย เพิ่มปีละ 270 MW ในปีพ.ศ. 2559และอีก 270 MW ในปีพ.ศ. 2560

**โรงไฟฟ้าใหม่มีกำลังการผลิตรวม 2000 MW ตามแผน PDP2015 ซึ่งจะมาแทน โรงไฟฟ้า บีแอลซีพี ดังนั้นในการหาระยะทางเฉลี่ยจึงคิดแค่ส่วนต่างที่เหลือจากการทดแทนโรงไฟฟ้า บีแอลซีพี

ตารางที่ 3 โรงไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า

ลำดับ	รายการ	กำลังการผลิต(MW)
1	โรงงานน้ำตาลไทยเอกลักษณ์-อุตรดิตถ์	23
2	บริษัท สหเรือง จำกัด	33
3	โรงงานน้ำตาลมิตรกาฬสินธุ์	10
4	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลอีสาน (กาฬสินธุ์)	15.5
5	โรงงานน้ำตาลขอนแก่น	30
6	โรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง (ขอนแก่น)	27
7	โรงงานรวมเกษตรกรอุตสาหกรรม (ชัยภูมิ)	80.3
8	โรงงานน้ำตาลวังขนาย (มหาวัง-มหาสารคาม)	18
9	โรงงานน้ำตาลเกษตรผล (อุดรธานี)	15
10	โรงงานน้ำตาลกุมภวาปี (อุดรธานี)	19.6
11	โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม (อุดรธานี)	24
12	โรงงานน้ำตาลเอราวัณ (หนองบัวลำภู)	39
13	โรงงานน้ำตาลไทยกาญจนบุรี (อุดรธานี)	8
14	โรงงานน้ำตาลขอนแก่น (วังสะพุง)	40
15	โรงงานรวมเกษตรกรมิตรภูหลวง (เลย)	67
16	โรงงานน้ำตาลบุรีรัมย์	19.4
17	โรงงานอุตสาหกรรมโคราช (นครราชสีมา)	42
18	โรงงานอุตสาหกรรมอ่างเวียน (นครราชสีมา)	34
19	โรงงานน้ำตาลครบุรี (นครราชสีมา)	26
20	โรงงานน้ำตาลสุรินทร์ (สุรินทร์)	30
21	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลสุพรรณบุรี(สุพรรณบุรี)	6.34
22	บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด (สุพรรณบุรี)	91.4
23	โรงงานน้ำตาลรีไฟน์ชัยมงคล (อู่ทอง-สุพรรณบุรี)	18
24	โรงงานน้ำตาลสิงห์บุรี (สิงห์บุรี)	18
25	โรงงานน้ำตาลสระบุรี (สระบุรี)	29.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

26	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ที.เอ็น. (ลพบุรี)	36
27	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ (อุทัยธานี)	18.5
28	โรงงานน้ำตาลทิพย์กำแพงเพชร (กำแพงเพชร)	25
29	โรงงานน้ำตาลทิพย์สุโขทัย (สุโขทัย)	35
30	โรงงานน้ำตาลพิษณุโลก (พิษณุโลก)	18.5
31	โรงงานน้ำตาลทรายกำแพงเพชร (กำแพงเพชร)	25
32	โรงงานน้ำตาลนครเพชร (กำแพงเพชร)	9.5
33	โรงงานรวมผลอุตสาหกรรมนครสวรรค์ (นครสวรรค์)	12.5
34	โรงงานเกษตรไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล (นครสวรรค์)	60
35	โรงงานไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม (เพชรบูรณ์)	29.5
36	โรงงานอุตสาหกรรมมิตรเกษตร (อุทัยธานี)	35
37	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลชลบุรี (ชลบุรี)	8
38	โรงงานน้ำตาลนิวกว้างสุ้นหลี (ชลบุรี)	14.5
39	โรงงานสหการน้ำตาลชลบุรี (ชลบุรี)	30
40	โรงงานน้ำตาลและอ้อยตะวันออก (สระแก้ว)	22
41	โรงงานน้ำตาลระยอง (ชลบุรี)	18
42	โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลปราณบุรี (ประจวบคีรีขันธ์)	8
43	โรงงานน้ำตาลราชบุรี (ราชบุรี)	50.5
44	โรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง (ราชบุรี)	18
45	โรงงานอุตสาหกรรมมิตรเกษตร (กาญจนบุรี)	20.5
46	โรงงานน้ำตาลไทยกาญจนบุรี (กาญจนบุรี)	5.6
47	โรงงานน้ำตาลนิวกรุงไทย (กาญจนบุรี)	65
48	โรงงานไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล (กาญจนบุรี)	19
49	โรงงานน้ำตาลท่ามะกา (กาญจนบุรี)	13
50	โรงงานประจวบอุตสาหกรรม (กาญจนบุรี)	11
51	โรงงานไทยเพิ่มพูนอุตสาหกรรม (กาญจนบุรี)	22

ตารางที่ 4 โรงไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้กากปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า

ลำดับ	รายการ	กำลังการผลิต(MW)
1	บริษัท สุราษฎร์ธานี กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด	9.9
2	บจก.กรีน เพาเวอร์ สเตชั่น (2552) (สุราษฎร์ธานี)	9
3	บจก.กลุ่มปาล์มธรรมชาติ (ชุมพร)	10
4	บจก.เจริญน้ำมันปาล์ม (ชุมพร)	6.7
5	บจก.ทรัพย์อนันต์ไบโอแมส (โครงการ1) (ชุมพร)	9.5
6	บริษัท ท่าฉางสวนปาล์มน้ำมันอุตสาหกรรม จำกัด (สุราษฎร์ธานี)	8
7	บจก.พีดีไอ สุราษฎร์ไบโอแมส (สุราษฎร์ธานี)	9.5
8	บจก.แสงศิริอุตสาหกรรมเกษตร (สุราษฎร์ธานี)	6.901
9	บจก. บจก.เอเอสทีปาล์มออยล์ (ประจวบคีรีขันธ์)	1.5
10	บริษัท ซาราฟเอ็นเนอร์ยี จำกัด (กระบี่)	12
11	บจก.ปาล์มพัฒนาไบโอแมส (ปัตตานี)	7.5
12	บจก.ศรีไสวคลีนพาวเวอร์ จำกัด (กระบี่)	7.5
13	บจก.โอทาโก้ จำกัด (ตรัง)	7.5
14	บมจ.สหอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (กระบี่)	4.05
15	บจก.ไทยทาโลว์ แอนด์ ออยล์ (โครงการ 3)	9.026
16	บริษัท ตรัง ไบโอเอเนอร์ยี จำกัด (ตรัง)	12.5
17	บริษัท ไฟฟ้าธรรมชาติ จำกัด (สุราษฎร์)	6.5
18	บริษัท เอส เค เพาเวอร์พลัส (สุราษฎร์)	9.9
19	บจก.บ้านโป่ง คลีน เอ็นเนอร์ยี (ราชบุรี)	6
20	บจก. เค บี วัน (นครราชสีมา)	0.25

ภาคผนวก ข
เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Greenhouse Gas Abatement Cost of Clinker Substitute in Thailand Cement Industry

Preeyanuj Chaemsiriwat [1,a], Weerin Wangjiraniran [2,b]

[1]Energy Technology and Management Graduate School Chulalongkorn University, Thailand

[2]Energy Research Institute Chulalongkorn University, Thailand 10330

[3] 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok Thailand. 10330

[a]p.chaemsiriwat@gmail.com, [b]weerin_w@yahoo.com

Keywords: Abatement Cost, Clinker Substitution, Fly ash, Cement

Abstract

This research study about CO_2 mitigation cost by using fly ash as a clinker substitute in Thailand cement industry measure. And also present the sensitivity analysis about the factors that affect the abatement cost. The proportion of quantity to use fly ash as a clinker is equal to 1 : 1 ton. The quantity of CO_2 emission equivalent to 0.825 ton_{CO2}/$tonne_{Cli}$. Use the information in year 2015 to analyze, such as the exchange rate, fly ash price and freight rate. And use average distance of fly ash transportation from the power plant to cement plant to calculate. From the information, the approach to reduce CO_2 by this method is without additional investment. Because fly ash is small it can be mixed with clinker before grinding process of the original process. The CO_2 mitigation unit cost of this method is equal to -106.16 USD/ton_{CO2}, which is regarded as a worthwhile investment. The factor is the most affect to mitigation unit cost is transportation rates. The transportation current rate is 0.092 USD/ton/km but if it increases, the abatement cost will also increase accordingly. Moreover we also calculate the optimum distance to decide on the purchase of fly ash from each of power plant.

1. Introduction

From the measure to reduce quantity of CO_2 by using fly ash as a clinker substitute in Thailand cement industry following information of the Thailand Power Development Plan 2015 (PDP2015) to increase coal power generation by clean coal technology. Thus, the amount of fly ash increases [1]. But we can bring fly ash to use as a clinker substitute material in cement industry to reduce CO_2 emission from cement production process, which cause a lot of CO_2 and other greenhouse gas. The information from research in Thailand found that fly ash has potential can use as a clinker substitute material.

From the research in the country and international about mitigation cost per unit of CO_2 reduction of Thailand. Such as the international research about The CO_2 Abatement Cost Curve (ACC) for the Thailand cement industry (Ali Hasanbeigi et al.,

2010). In the form of a graph comparing cost of different technology with the potential to reduce CO_2 of 41 technology. Using the bottom-up CO_2 ACC model and 15 year scenario period (2010-2025), the CO_2 reduction equal to 3095 ktonnesCO_2/year. And conducted a sensitivity analysis for the discount rate parameter [2]. The research study about the cost of reducing CO_2 emissions: integrating abatement technologies into economic modeling (O.Kiuila, T.F. Rutherford., 2013). Use an economy wide method and a sector specific method. This research use two techniques of present an abatement function, a traditional and a hybrid (discrete technology modeling). The result of both approach suggest the current climate policy in Switzerland will not be able to move the economy towards the required 10% CO_2 reduction [3]. The research about quantifying co-benefit potentials in the Chinese cement sector during 12^{th} five year plan (2011-2015): an analysis based on marginal abatement cost monetized environmental effect (Yang Xi et al., 2013). The result show the co-benefit of 18 main carbon mitigation technologies and the range of co-benefit varies from -3 RMB/tCO_2 to 267 RMB/tCO_2 [4]. The research in Thailand is about the use of economic instruments to reduce emissions of greenhouse gas for Thailand by Thailand Development Research Institute (TDRI). Conducted a study on marginal cost of reducing greenhouse gas emissions for different sectors in Thailand. To contribute to the reduction of greenhouse gas emissions efficiently with minimum cost. Use the information of the operator under the Clean Development Mechanism (CDM) projects. There is a difference value from 0.013 USD to 23.31 USD according to branch production analysis [5].

In this research we use economic instruments to analyze the mitigation unit CO_2 reduction by using fly ash as a clinker substitute material in Thailand cement industrial. Including sensitivity analysis about discount rate, fly ash cost and transportation rates are affecting to unit cost. Using data in 2015 to calculate in this research and using information from the expert. So that the result are accurate and close to the current.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. Objective

Study and evaluation of unit cost of CO_2 reduction from using fly ash as a clinker substitute material in Thailand cement industry.

3. Methodologies

Calculation of Greenhouse Gas Abatement Cost

Beginning with study the steps to apply fly ash as a clinker substitute material in cement manufacturing. The fly ash is small, it can mix with clinker before grinding process and move to the cement manufacturing process in the next stage. For calculate the CO_2 abatement cost in this research, follow the Eq. 1 to calculate the full cost of abatement option:

$$M = \frac{A + TC - OC}{Q} \quad \cdot \tag{1}$$

Where M is mitigation unit cost of abatement option (USD/ton$_{CO2}$), “A” is annuity of investment (USD/year), “TC” is total cost of fly ash (USD/ton), “OC” is

operating and maintenance cost (USD/ton) and "Q" is quantity of mitigated CO_2 ($ton_{CO2}/tonne_{Cli}$). If the results M > 0, the CO_2 reduction approach need support in term of investment or subsidy on fixed cost or operating and maintenance cost. And if M < 0 that method does not require investment or additional support.

From the information, the processes to bring fly ash to use as a clinker substitute material. The same process can be used. There is no need to install additional or machinery.

$$A = Ii \div \left\{ 1 - \frac{1}{(1+i)^N} \right\} \quad . \tag{2}$$

From Eq. 2, where A is annuity of investment (USD/year), "I" is Investment (USD), "i" is discount rate (% per annum). In part of "i" calculate from WACC+X, where "WACC" is weighted average cost of capital and "X" is required surplus return, "i" is equal to 12% and 33%. And "N" is lifetime is equal to 25 year. Because of the investment of this method has a value is zero. Make the result in part "A" is zero as well.

Define the operating and maintenance cost or "OC" is equal to 145.99 USD/ton. Although take a new method, the equal of "OC" does not change. Benefit is occurs with cement factory.

Cost of this method is Total Cost (TC) of fly ash, this relationship can calculate from a simple linear regression analysis, follow the Eq.3 to calculate.

$$TC = F + TD \quad . \tag{3}$$

Where "TC" is total cost of fly ash (USD/ton), F is fly ash cost is equal to 4.96 USD/ton combine with Transportation rate "T" is equal to 0.092 USD/ton/km multiplied by the distance use in transportation of fly ash from power plant at Lampang province to cement plant at Saraburi Province, the average distance is equal to 580.95 km

$$Q = \sum_j q_j EF_j \tag{4}$$

From Eq.4, where "Q" is quantity of mitigated CO_2 ($tonCO_2/tonne_{cli}$), "q" is quantity of clinker save by mitigation, but we calculate at per ton clinker. "EF" is emissions factor of clinker save by mitigation is equal to 0.825 $tonCO_2/tonne_{cli}$ sourced from World Business Council for Sustainable Development's Cement Sustainability Initiative: WBCSD CSI use in calculation in research.

4. Result

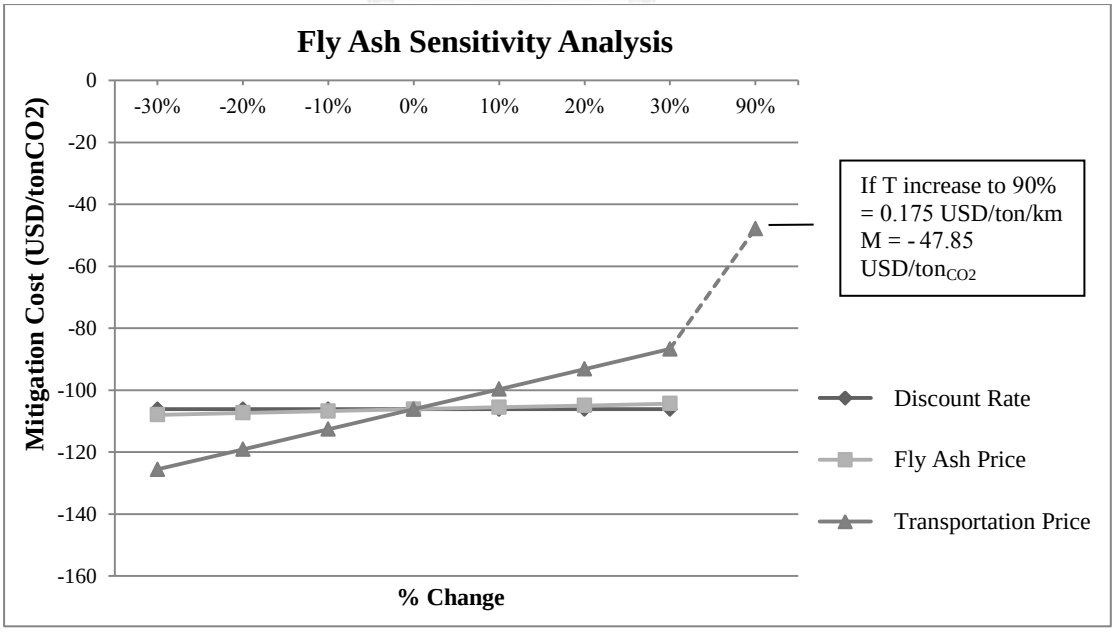
Table 1 mitigation unit cost of CO_2 reduction from use fly ash as a clinker substitute material

Detail	Unit	Fly ash
Mitigation Investment (I)	USD	0
Discount Rate (i) WACC + x	% per annum	0.33
Economic life of equipment	Year	25
Amortized Investment (A)	USD/Year	0
Total Cost (TC)	USD	58.39
Operating Cost (OC)	USD	145.99
Quantity of mitigated CO_2 (Q)	$ton_{CO2}/tonne_{Cli}$	0.825**
CO2 Mitigation Cost (M)	USD/ton_{CO2}	-106.16

*Using the average exchange rate of the year 2015; 34.25 THB = 1 USD
**Emissions factor of clinker save by mitigation is equal to 0.825 $ton_{CO2}/tonne_{Cli}$

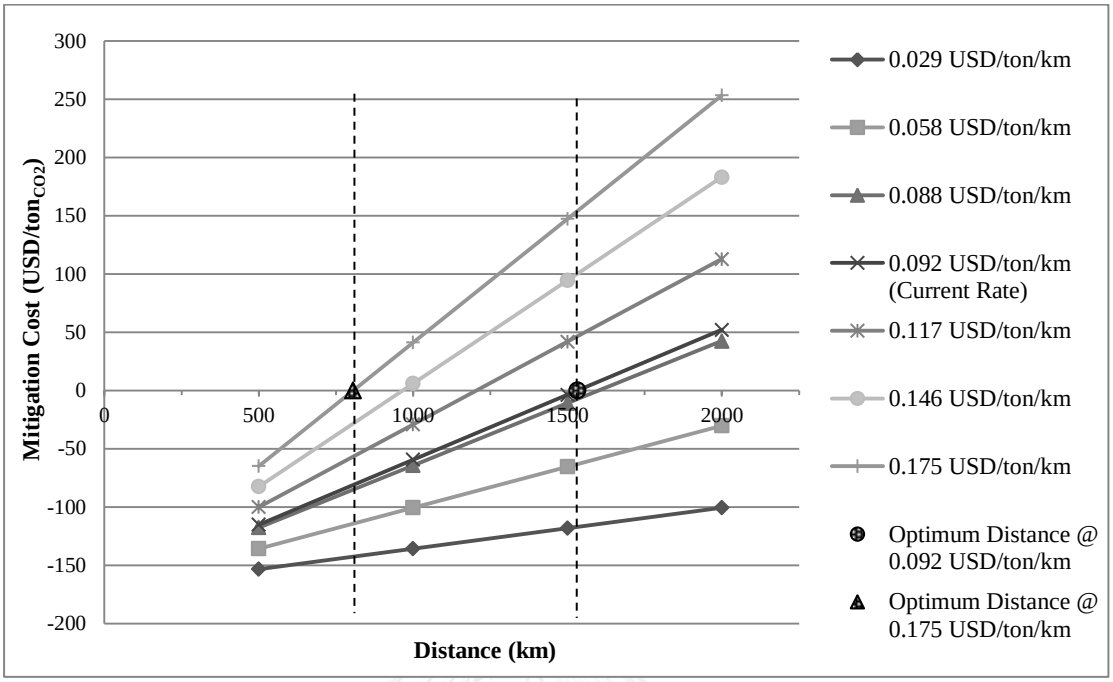
CO_2 mitigation cost to use fly ash as a clinker substitute material is equal to -106.16 USD/ton_{CO2} can calculate mitigation cost from information in table 1. Where $M < 0$ that method does not require investment or additional support. And sensitivity analysis about discount rate, fly ash cost and transportation rates are affecting to unit cost. The factors that high affect to abatement cost is transportation rate. If transportation rate increase to 90% or approximately 0.175 USD/ton/km, it will make abatement cost up to -47.85 USD/ton_{CO2} as show in the graph show in fig 1.

Fig. 1 Sensitivity analysis of using fly ash as a clinker substitute material



Because of the transportation rates are relate to distance use to transport directly proportional, as show in the figure below.

Fig. 2 The change of transportation rates and distance that affect to abatement cost



From fig. 2, we calculate the optimum distance that makes abatement cost equal to zero in order to consider buying fly ash. Divided into 2 cases, in case 1 at current transportation rate 0.092 USD/ton/km, the optimum distance is equal to 1532.93 km. case 2 at transportation rate is increase to 0.175 USD/ton/km, the optimum distance is equal to 805.89 km. If transportation rate is increase, will affect to potential use of fly ash. Because may be cement factory will reject to use fly ash as a clinker substitute material. This information use to purchase fly ash from power plant and use to decide on distance of fly ash transportation not more than optimum distance. The result show in table 2.

Chulalongkorn University

Table 2 The average distance of fly ash transportation from power plants to cement plants

Power Plant / Cement Plant	Lampang Province	BLCP Power Ltd.	Krabi Province	Songkhla Province
Siam Cement (ThungSong) Co.,Ltd.	1390	952	116	276
Siam Cement (Lampang) Co.,Ltd.	68	826	1418	1629
Siam Cement (Kengkoi) Co.,Ltd.	573	270	926	1137
Siam Cement (Khao Wong) Co.,Ltd.	563	290	928	1139
Siam Cement (Tha Luang) Co.,Ltd.	562	284	911	1122
Siam City Cement Public Co.,Ltd.-Saraburi	583	272	927	1138
TPI Polene Public Co.,Ltd. -Saraburi	581	274	929	1141
Asia Cement Public Co.,Ltd. -Saraburi	558	290	920	1139
Jalapratan Cement Public Co.,Ltd. - Phetchaburi	786	348	642	875
Jalapratan Cement Public Co.,Ltd.-Nakhon Sawan	465	383	993	1199
Thai Pride Cement Public Co.,Ltd. - Saraburi	563	289	943	1155
Cemex (*Thailand*) *Co.,Ltd.* - Saraburi	547	292	929	1141

Case 1 Transport distance > Optimum Distance at transportation rate 0.092 USD/ton/km

Case 2 Transport distance > Optimum Distance at transportation rate 0.175 USD/ton/km

5. Conclusion

The approach to reduce quantity of CO_2 by using fly ash as a clinker substitute in Thailand cement industry have an abatement cost of CO_2 reduction is equal to -106.16 USD/tonCO_2, this method does not require investment or additional support. And the factor are high affect to abatement cost is transportation rate**.** The optimum distance at current transportation rate is equal to 1532.93 km. There is only one part that is more value, but the cement factory can purchase fly ash from nearby power plant. This same method can applied to calculate cost of CO_2 reduction by using biomass ash as a clinker substitute material. Not only reduce CO_2 but also use for agriculture waste disposal too.

Reference

[1] PDP2015,Thailand Power Development Plan 2015-2036, Report of Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, 2015.

[2] Ali Hasanbeigi, Christoph Menke and Lynn Price, in: *The CO_2 abatement cost curve for the Thailand cement industry*, submitted to Journal of Cleaner Production 18(2010)

[3] O. Kiuila, T.F. Rutherford, in: *The cost of reducing CO_2 emissions: integrating abatement technologies into economic modeling*, submitted to Ecological Economics 87(2013)

[4] Yang Xi, Teng Fei, Wang Gehua, in: *Quantifying co-benefit potentials in the Chinese cement sector during 12th five year plan: an analysis based on marginal abatement cost monetized environmental effect*, submitted to Journal of Cleaner Production 58(2013)
[5] Israngkura A, Thampanishvong K, Laengcharoen P and Meethom P, in: *The use of economic instruments to reduce greenhouse gas emissions for Thailand*, report of Thailand Development Research Institute (2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เอกสารที่ได้รับการเผยแพร่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ABATEMENT COST OF CLINKER SUBSTITUE USING BIOMASS ASH UTILIZATION IN THAILAND CEMENT INDUSTRY

Preeyanuj Chaemsiriwat[1], Weerin Wangjiraniran [2]

[1]Energy Technology and Management Graduate School, Chulalongkorn University, 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand, p.chaemsiriwat@gmail.com

[2] Energy Research Institute, Chulalongkorn University, 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand, weerin_w@yahoo.com

Received Date June 15th 2016

Abstract

This research is intended to study the cost clinker substitute by using bagasse ash and palm oil fuel ash in Thailand cement industry, which is an agriculture waste to reduce CO_2 emission from the production of cement. Using both of ash as clinker substitute material is the approach to reduce CO_2 without additional investment. No need to install new machines because the ash can mixed with clinker before grinding process. The proportion of quantity to use clinker substitute material as a clinker is equal to 1 : 1 ton. The quantity of CO_2 emission is equivalent to 0.825 $ton_{CO2}/tonne_{Cli}$. Define the operating cost of cement production process is equal to 145.99 USD/ton. The exchange rates and other information will use to analysis is the data in year 2015.

The results are dividing into 3 cases. First case, ash price = 0 USD/ton and transportation rate (current rate) = 0.092 USD/ton/km the result of CO_2 abatement cost of bagasse ash and palm oil fuel ash is equal to -134.19 USD/ton_{CO2} and -91.66 USD/ton_{CO2} respectively. Second case, when trading ash has a higher value. Reference value is equivalent to fly ash price are current trading = 4.96 USD/ton and transportation rate (current rate) = 0.092 USD/ton/km the result of CO_2 abatement cost of bagasse ash and palm oil fuel ash is equal to -128.18 USD/ton_{CO2} and -85.65 USD/ton_{CO2} respectively. Last case, if price of ash and transportation rate increase to 7.88 USD/ton and 0.175 USD/ton/km, respectively. The result of CO_2 abatement cost of bagasse ash and palm oil fuel ash is equal to -86.06 USD/ton_{CO2} and -5.15 USD/ton_{CO2}, respectively. The abatement cost of bagasse ash and palm oil is not same because transportation distance of both ashes is not equal. From the result, the abatement cost of CO_2 reduction is negative. Even ash price and transportation rate increased, which means the method to use biomass ash as a clinker substitute material to reduce CO_2 emissions is worth the investment. In addition, the sensitivity analysis factors affect the cost per unit change. Moreover, calculating the optimum distance which was used in transportation relate to the transportation rates, which will not make cost per unit is too high.

Keywords: Abatement Cost, Biomass ash, Clinker Substitution, Cement

Introduction

Cement industry is one of main categories, which lots of CO_2 emissions from production process. The information from the Cement Technology Road map 2009 Carbon Emission Reductions up to 2050 report publish by International Energy Agency (IEA) and World Business Council for Sustainable Development's Cement Sustainability Initiative (WBCSD CSI), present the 4 technologies to reduce CO_2 emission in cement industry [1].

Clinker substitution is 1 of 4 technologies is interesting and appropriate to Thailand. Because Thailand is an agricultural country, some of agricultural production is a raw material in industry such as sugar cane and palm. Waste from agriculture industry can use as fuel for electricity generation in biomass power plants and become to lots of biomass ash that has not bring to utilize. According to Thailand Power Development Plan 2015-2036 (PDP 2015), there are plans to encourage the use of renewable energy [2]. Trend of cultivation area will increase which directly affect to quantity of biomass ash will be increase.

The research in Thailand about quality, characteristics and properties of bagasse ash and palm oil fuel ash that can use as a clinker substitute material by a special using the right amount [3,4]. But size of bagasse ash and palm oil fuel ash is larger than clinker, therefore need to grind before mixed with clinker. At first we think the biomass grinding process may need to install a new grinding machine. The information from the expert, no need to install new machine but can bring bagasse ash or palm oil fuel ash mixed with clinker before grinding process.

From the research in the country and international about mitigation cost per unit of CO_2 reduction of Thailand such as the international research about The CO_2 Abatement Cost Curve (ACC) for the Thailand cement industry (Ali Hasanbeigi et al., 2010) shows the form of a graph which compared to cost of different technology with the potential to reduce CO_2 of 41 technology. Using the bottom-up CO_2 ACC model and 15 year scenario period (2010-2025), the CO_2 reduction is equal to 3095 ktonnesCO_2/year and conducted a sensitivity analysis for the discount rate parameter [5]. The research in Thailand is about the use of economic instruments to reduce emissions of greenhouse gas for Thailand by Thailand Development Research Institute (TDRI). Conducted a study on marginal cost of reducing greenhouse gas emissions for different sectors in Thailand. To contribute to the reduction of greenhouse gas emissions efficiently with minimum cost. Use the information of the operator under the Clean Development Mechanism (CDM) projects. There is a difference value from 0.013 USD to 23.31 USD according to branch production analysis [6].

To support new measures for reducing the amount of CO_2, cost is very important. If new measures have a high cost maybe the operators decided not to invest. The using biomass ash as a clinker substitution can use in the same cement production process, no need install new machine and investment. The current price of bagasse ash and palm oil fuel ash is zero, the only cost is freight. In this research we use the data in year 2015 information from the expert to calculate the CO_2 mitigation cost such as exchange rate, transportation rate and ash price. And also sensitivity analysis the factor that affect to cost of CO_2 reduction by using biomass ash as a clinker substitute material.

Methodology

The methodology for analysis in this research, use the same assumption and method as well as the research "Greenhouse Gas Abatement Cost of Clinker Substitute in Thailand Cement Industry" which studied about abatement cost of CO_2 reduction by using fly ash as a clinker substitute material in Thailand cement industry. Detail of methodology present according to below [7].

Analysis Method

Beginning with study the steps to apply biomass ash as a clinker substitute material in cement manufacturing. Even size of bagasse ash and palm oil fuel ash larger than clinker, but it can mix with clinker before grinding process in production line and move to the next stage. For calculation of CO_2 abatement cost in this research, we follow the procedure described below.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$M = \frac{A + TC - OC}{Q} \quad (1)$$

M = Mitigation unit cost of abatement option in USD/ton_{CO2}

A = Annuity of investment in USD/year

TC = Total cost of fly ash in USD/ton

OC = Operating and maintenance cost in USD/ton

Q = Quantity of mitigated CO_2 (ton_{CO2}/$tonne_{Cli}$)

With this results if M > 0, the CO_2 reduction approaches need support in term of investment or subsidy on fixed cost or operating and maintenance cost. And if M < 0 that method does not require investment or additional support.

From the information, the processes to bring fly ash to use as a clinker substitute material. The same process can be used. There is no need to install additional or machinery.

$$A = Ii \div \left\{1 - \frac{1}{(1+i)^N}\right\} \quad (2)$$

A = Annuity of investment in USD/year

I = Investment in USD

I = Discount rate in % per annum

N = Lifetime is equal to 25 year

In part of "I" calculate from WACC+X, where "WACC" is weighted average cost of capital and "X" is required surplus return, "i" is equal to 33%. Because of the investment of this method has a value is zero. Make the result in part "A" is zero as well. The operating and maintenance cost or "OC" is equal to 145.99 USD/ton. Although take a new method, the equal of "OC" does not change. Benefit is occurs with cement factory.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Cost of this method is Total Cost of biomass ash (TC), this relationship can be calculated from a simple linear regression analysis as shown in Eq.3.

$$TC = F + (T * D) \quad (3)$$

TC = Total cost of biomass ash in USD/ton

F = Ash cost in USD/ton

T = Transportation rate in USD/ton/km

D = Distance use in ash transportation in km

T is equal to 0.092 USD/ton/km and refers to the current rate of fly ash transportation multiplied with transportation distance of bagasse ash or palm oil fuel ash from each factory of to each cement plant. In this research have 51 factories of

bagasse ash, 20 factories of palm oil fuel and 12 cement plants, so we use the weighted average method to calculate transportation distance of each ash.

$$Q = \sum_j q_j EF_j \quad (4)$$

Q = quantity of mitigated CO_2 in $tonCO_2/tonne_{cli}$

q = quantities of clinker save by mitigation in $tonne_{cli}$

EF = emissions factor of clinker save by mitigation in $tonCO_2/tonne_{cli}$

EF is equal to 0.825 $tonCO_2/tonne_{cli}$ sourced from World Business Council for Sustainable Development's Cement Sustainability Initiative: WBCSD CSI use for calculation. The proportion of quantity to use clinker substitute material as a clinker is equal to 1 : 1 ton, thus calculate at 1 tonne of clinker.

Result

Because have many factory in this research, including 51 factories of bagasse ash, 20 factories of palm oil furl and 12 cement plants. The result of bagasse ash transportation distance and palm oil fuel ash transportation distance use in mitigation cost analysis calculate from weight average method is in the table 1 below.

Table 1. Transportation distance by weight average method

Transportation distance of bagasse ash	383.51 km
Transportation distance of palm oil fuel ash	732.13 km

For calculation the mitigation cost of CO_2 reduction is divided into 3 cases.

- Case I: the current price of bagasse ash or palm oil fuel ash is 0 USD/ton and transportation rate is equal to 0.092 USD/ton/km which refers to fly ash transportation rate in year 2015
- Case II: price of both ash and transportation rate refer to information of fly ash in year 2015 is equal to 4.96 USD/ton and 0.092 USD/ton/km, respectively.
- Case III: in the future, if the biomass ash will be traded, so the price of biomass ash increase to 7.88 USD/ton and transportation rate increase to 0.175 USD/ton/km.

The result of all 3 cases show in table 2

Table 2. CO_2 mitigation cost by using bagasse ash or palm oil fuel ash as a clinker substitution of 3 Cases

Detail	Unit	Case I		Case II		Case III	
		Bagasse	Palm oil fuel	Bagasse	Palm oil fuel	Bagasse	Palm oil fuel
Mitigation Investment (I)	USD	0	0	0	0	0	0
Discount Rate (i)	% per annum	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Economic life of equipment	Year	25	25	25	25	25	25
Amortized Investment(A)	USD/Year	0	0	0	0	0	0
Operating Cost (OC)	USD	145.99	145.99	145.99	145.99	145.99	145.99
Total Cost of Ash (TC)	USD	35.28	70.37	40.24	75.33	74.99	141.74
Ash Cost (F)	USD/ton	0.00	0.00	4.96	4.96	7.88	7.88
Distance (D)	Km	383.51	764.92	383.51	764.92	383.51	764.92
Transportation Price (T)	USD/ton/km	0.092	0.092	0.092	0.092	0.175	0.175
Reduced CO_2 (Q)	tonCO_2/tonnecli	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825
CO_2 Mitigation Cost (M)	USD/ton CO_2	**-134.19**	**-91.66**	**-128.18**	**-85.65**	**-86.06**	**-5.15**

* Use the average exchange rate in year 2015; 34.25 THB =1 USD
* Emissions factor of clinker save by mitigation is equal to 0.825 $ton_{CO2}/tonne_{Cli}$

Result of CO_2 mitigation cost of all 3 cases is negative, where M < 0 this measure did not require the investment to install new machine or additional support. The approach to reduce CO_2 by using bagasse ash or palm oil fuel ash as a clinker substitution which is the interesting and worth to invest.

The result from sensitivity analysis of bagasse ash and palm oil fuel ash about discount rates, ash price and transportation rates is in the same way. Show in graph below.

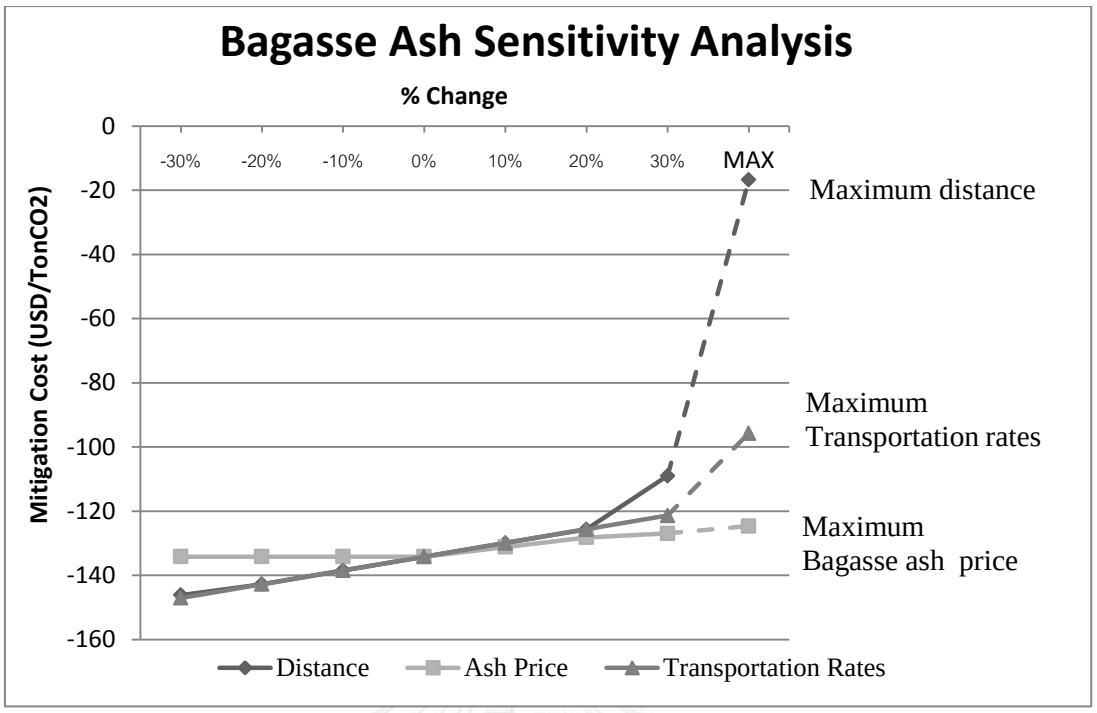


Figure 1. Sensitivity analysis of bagasse ash in case I; bagasse ash price = 0 USD/ton, transportation rate = 0.092 USD/ton/km and average distance =383.51 km.

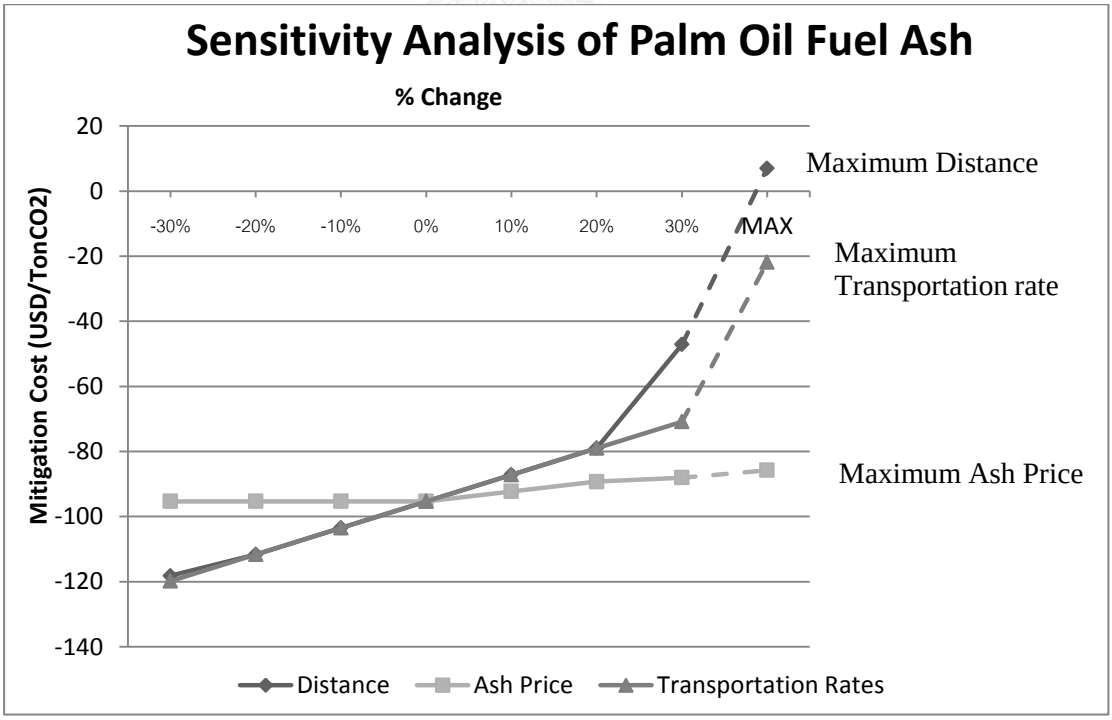


Figure 2. Sensitivity analysis of bagasse ash in case I; bagasse ash price = 0 USD/ton, transportation rate = 0.092 USD/ton/km and average distance = 732.13 km.

From sensitivity analysis of bagasse ash and palm oil fuel ash, the factors that high affect to abatement cost is transportation rates. In the future if fuel price has high value, the transportation rates will increase which will impact to abatement cost of CO_2 directly. So, the distance of transportation relate to abatement cost of CO_2.

Because of the different distance of transportation, therefore we calculate the optimum distance by using purchased bagasse ash or palm oil fuel ash from factory. Decision on ash transportation distance from factory to cement is not more than optimum distance. The optimum distance can be calculated from equation 1, we assume M = 0 USD/ton CO_2. The information in 3 cases was used to calculate optimum distance, so have 3 answers of optimum distance in table below.

Table 3. Optimum distance of 3 Cases

Detail	Optimum Distance (km)
Case I Ash price = 0 USD/ton, Transportation rate = 0.092 USD/ton/km	1586.85
Case II Ash price = 4.96 USD/ton Transportation rate = 0.092 USD/ton/km	1532.93
Case III Ash price = 7.88 USD/ton Transportation rate = 0.175 USD/ton/km	789.2

Conclusion

Abatement cost of the approach to reduce CO_2 from cement industry in Thailand by using bagasse ash or palm oil fuel ash as a clinker substitution is divided into 3 cases

- Case I: ash price is equal to 0 USD/ton and transportation rate is equal to 0.092 USD/ton/km. Abatement cost of CO_2 reduction by using bagasse ash is equal to
  -134.19 USD/ton CO_2 and by using palm oil fuel ash is -91.66 USD/ton CO_2
- Case II: price of both ash and transportation rate refers to information of fly ash in year 2015 which is equal to 4.96 USD/ton and 0.092 USD/ton/km, respectively. Abatement cost of CO_2 reduction by using bagasse ash is equal to -128.18 USD/ton CO_2 and by using palm oil fuel ash is equal to -85.65 USD/ton CO_2
- Case III: in the future, if the biomass ash will be traded, the price of biomass ash increase to 7.88 USD/ton and transportation rate increase to 0.175 USD/ton/km. Abatement cost of CO_2 reduction by using bagasse ash is equal to -86.06 USD/ton CO_2 and by using palm oil fuel ash is equal to -5.15 USD/ton CO_2

Result of abatement cost of CO_2 reduction based on data in year 2015. The transportation distance which was used in calculation is the distance by weighted average method. In case of purchasing ash from factory to cement plant, the real distance from each factory to each cement plant will be used to calculate for accurate answer that will impact to abatement cost because the transportation distances relate to transportation rates directly.

Reference

[1] Cement Road Map, *Cement Technology Roadmap 2009 Carbon emissions reductions up to 2050*, Report of the International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development, 2009.

[2] PDP2015,*Thailand Power Development Plan 2015-2036*, Report of Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, 2015.

[3] J.Chai, T. Weerachart, *Utilization of Waste Ashes and Waste Materials from Industries as Concrete Materials*, Department of civil engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi press, Bangkok, Thailand, 2012.

[4] J.Chai, Waste Ashes from Industries: Pozzolan materials for concret, Implementations"*Thailand Concrete Association Journal*, Vol.26-5, 2015.

[5] Ali Hasanbeigi, Christoph Menke and Lynn Price, "The CO_2 abatement cost curve for the Thailand cement industry", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18, pp.1509-1518, 2010.

[6] Israngkura A, Thampanishvong K, Laengcharoen P and Meethom P, in: *The use of economic instruments to reduce greenhouse gas emissions for Thailand*, report of Thailand Development Research Institute, 2012.

[7] C.Preeyanuj, and W.Weerin "Greenhouse Gas Abatement Cost of Clinker Substitute in Thailand Cement Industry", journal of Materials Science Forum, ISSN: 1662-9752, Trans Tech Publications, 2016.

ภาคผนวก ค
อภิธานศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Alternative Energy Development Plan (AEDP)	แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก คือแผนที่มีการจัดการและวางแผนเกี่ยวกับการกำหนดเป้าหมาย เรื่องพลังงานทดแทน ทั้งพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น ของประเทศไทย 20 ปี (ดูเพิ่มเติม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)
Alternative Fuel	พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานใดๆ ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทดแทนแหล่งพลังงาน ซึ่งสะสมตามธรรมชาติและใช้หมดไป เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ฯ พลังงานทดแทนภายในประเทศซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า มีอาทิ พลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม ความร้อนใต้พิภพ น้ำ พืช วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ขยะ ฯ เนื่องจากพลังงานทดแทนดังกล่าวมีกระจายอยู่ตามธรรมชาติและไม่มีความสม่ำเสมอ (ดูเพิ่มเติม สวทช.)
Annuity of Investment (A)	ต้นทุนเฉลี่ยรายงวด หน่วย THB/year
Air Separator	เครื่องแยกขนาดด้วยลม
Ash Cost per trip (C)	ต้นทุนของเถ้าคิดเป็นต่อเที่ยวการขนส่ง หน่วย THB/trip
Ash Price (AP)	ราคาของเถ้าแต่ละชนิด หน่วย THB/t_{Ash}
Bagasse Ash หรือ Bagasse Fly Ash	เถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุพลอยได้จาโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งใช้ชานอ้อยเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Ball Mill	หม้อบดปูนซีเมนต์
Biomass Ash	เถ้าชีวมวล เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้เชื้อเพลิง ประเภทชีวมวลต่างๆ เช่น แกลบ ชานอ้อย กะลาปาล์ม เป็นต้น
Calcination Reaction	ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเตาเผา ในกระบวนการผลิตปูนเม็ด เกิดจากการวัตถุดิบได้รับความร้อนแล้วเปลี่ยนสภาพ หรือ หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างการหลอมรวมความร้อนจากการเผาไหม้ในเตาเผาทำให้แร่ธาตุและสารเคมีทำปฏิกิริยากัน
Carbon Capture and Storage	เทคโนโลยีดักจับและกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหมเชื้อเพลิง มี 3 เทคโนโลยี คือ เทคโนโลยีกักเก็บก่อนเผาไหม้ เทคโนโลยีกักเก็บหลังการเผาไหม้ และเทคโนโลยีกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจน
Cement Sustainability Initiative: CSI	กลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ภายใต้ สภานักธุรกิจโลกเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน WBCSD
Cement Mill	หม้อบดซีเมนต์
Clinker Substitution	วัสดุทดแทนปูนเม็ด เป็นเทคโนโลยีการใช้วัสดุต่างๆที่มีคุณสมบัติประสาน หรือ วัสดุปอซโซลาน มาใช้ทดแทนปูนเม็ดเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยวัสดุทดแทนปูนเม็ดที่ใช้ได้แก่ เถ้าลอย ตระกรันจากเตาถลุงเหล็กผงหินปูนและเถ้าชีวมวล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	เป็นต้น (ดูเพิ่มเติม Cement Technology Roadmap 2009 Carbon Emission Reductions up to 2050)
Clinker	ปูนเม็ด เกิดจากกระบวนการที่นำส่วนผสมต่างๆ ได้แก่หินปูน หินดินดาน วัสดุปรับแต่งคุณสมบัติ และอื่นๆ นำเข้าสู่กระบวนการผลิตในเตาเผา Kiln ที่อุณหภูมิ 1200 -1650 องศาเซลเซียส จนเกิดปฏิกิริยาเคมีจนได้ปูนเม็ด
Cooler	ลมเป่า ใช้ในการทำให้ปูนเม็ดที่ผ่านกระบวนการเผาเย็นตัวลงจนเหลือประมาณ 65 องศาเซลเซียส
CO_2 Abatement Cost	กราฟแสดงเส้นต้นทุนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับศักยภาพปริมาณการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละเทคโนโลยี หน่วย THB/t_{CO2}
Crusher	เครื่องย่อย ใช้สำหรับลดขนาดของหินปูนก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตปูนเม็ด
Corrective Materials	วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบบางตัว ซึ่งมีไม่เพียงพอในดินดำหรือดินดาน วัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ ทราย (ในกรณีที่ต้องการซิลิคอนไดออกไซด์) แร่เหล็กหรือดินลูกรัง (ในกรณีที่ต้องการเฟอร์ริกออกไซด์) และดินอะลูมินา (ในกรณีที่ต้องการอะลูมินัมออกไซด์) เป็นต้น (ดูเพิ่มเติม การผลิตปูนเม็ด)
Direct Emission	กระบวนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางตรงจากกระบวนการผลิต มี ส่วนคือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	กระบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี และกระบวนการที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
Discount rate (i %)	อัตราคิดลด หน่วย %/year
Distance of Transportation (D)	ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งเถ้าแต่ละชนิด หน่วย km
Dry Process	กระบวนการผลิตแบบแห้ง
Economic life of Equipment (N)	อายุการใช้งานของอุปกรณ์ หน่วย year
Emission Factor	สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปูนเม็ด ใช้คำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตปูนเม็ดที่ 0.825 $t_{CO2}/t_{Clinker}$
Fly Ash	เถ้าลอย Pulverized Fuel Ash หรือ เถ้าปลิว หรือ ฟลายแอช (fly ash) คือ ขี้เถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน มีขนาดเล็กและละเอียดมาก ประกอบด้วยสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยจะปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง (ดูเพิ่มเติม Fly Ash Facts for Highway Engineers)
Indirect Emission	กระบวนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางอ้อมจากการแหล่งภายนอก อาทิเช่น ไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า ซึ่งได้คำนวณการปล่อยจากภาคพลังงานแล้ว
International Energy Agency (IEA)	องค์การพลังงานระหว่างประเทศ
Investment (I)	เงินลงทุน หน่วย THB

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Kiln	เตาเผา หรือห้องเผาไหม้ ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์
Lime Stone	หินปูน เป็นหินในกลุ่มหินตะกอน มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า แร่แคลไซต์ (Calcite) เป็นหินตะกอนคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในท้องทะเล ทั้งจากสารอนินทรีย์ และซากสิ่งมีชีวิต เช่น ปะการัง และกระดองของสัตว์ทะเล ซึ่งถับถมกันภายใต้ความกดดันและตกผลึกใหม่เป็นแร่แคลไซต์จึงทำปฏิกิริยากับกรด เนื้อแน่นละเอียดทึบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือสีดำ
Loss on Ignition: LOI	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา
Maximum Distance	ระยะทางการที่ไกลที่สุดที่ใช้ในการขนส่งเถ้าที่จะไม่ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการลดก๊าซคาร์-บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าศูนย์ (AC > 0)
McKinsey & Company	เป็นบริษัทที่ปรึกษาด้านการบริหารชั้นนำของโลก ทั้งในด้านกลยุทธ์ การบริหารองค์กรโดยรวม นโยบาย การจัดการต้นทุนและผลกำไร การวิจัยและพัฒนา รวมถึงระบบข้อมูลด้านการบริหาร
Mixed Cement	คือปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับวัสดุเฉื่อยเช่น ทรายหิน เหมาะสำหรับงาน ก่อ ฉาบ ปั้นปูน
Number of Transportation per year (NT)	การขนส่งเถ้าแต่ละชนิดคิดเป็นจำนวนเที่ยวการขนส่งต่อปี หน่วย trip/year
Operating Cost (OC)	ต้นทุนการดำเนินงาน หน่วย THB/year
Palm Oil Fuel Ash	หรือ Palm Oil Fuel Fly Ash เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	ได้แก่ เส้นใย เศษกะลา และทะลายปาล์ม เปล่าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิเผาไหม้ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส
Portland Cement	ปูนเม็ดบดรวมกับยิปซั่มจะได้ปูนซีเมนต์ที่เรียกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์
Power Development Plan: PDP	แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (Power Development Plan: PDP) เป็นแผนแม่บทในการผลิตไฟฟ้าของประเทศ ว่าด้วยการจัดหาพลังงานไฟฟ้าในระยะยาว 15 -20 ปี
Pre-heater	ชุดเพิ่มความร้อน
Quantity of Mitigated CO_2	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง หน่วย t_{CO2}/year
Quantity of clinker save by abatement option (q_j)	ปริมาณของปูนเม็ดที่ลดลง หน่วย $t_{Clinker}$/year
Raw Meal Homogenizing Silo	ยุ้งผสมวัตถุดิบสำเร็จ
Raw Mill	หม้อบดวัตถุดิบ
Rotary Kiln	เตาเผาแบบหมุน หรือโรตารี่ เป็นเตาเผาสำหรับผลิตปูนเม็ด
Semi-Dry Process	กระบวนการผลิตแบบกึ่งแห้งหรือแบบเผาหมาด
Shale	หินดินดาน หินชั้นซึ่งประกอบด้วยแร่ดิน (clay minerals) เป็นส่วนใหญ่ แร่ดินนี้เป็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	สารผสมของอะลูมิเนียมซิลิเกตกับแมกนีเซียมซิลิเกตในส่วนต่างๆ กันและมีสมบัติประจำคือ ละเอียดมาก บี้กับน้ำแล้วเหนียวติดมือ หินดินดานบางชนิดย่างไฟแล้วให้น้ำมัน ซึ่งเมื่อนำมากลั่นจะได้น้ำมันคุณภาพต่างๆ กัน จึงเรียกหินดินดานนั้นว่า หินน้ำมัน (oil shale)
Slurry	ของเหลวในบ่อกวนมีลักษณะค่อนข้างข้นคล้ายน้ำโคลนเรียกว่า น้ำซีเมนต์
Slurry Feeder	เครื่องป้อนน้ำซีเมนต์
Slurry Mill	หม้อบดดิน
Slurry Storage Mill	ถังเก็บวัตถุดิบที่ผ่านเครื่องกรองละเอียด ทำหน้าที่กวนจนกว่าส่วนผสมจะเข้ากันดี
Storage Yard	กองเก็บวัตถุดิบ
The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)	อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศ
Thailand Industrial Standards (TIS)	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)
Total Cost of Ash (TC)	ต้นทุนรวมของเถ้า หน่วย THB/year
Transportation Rate (T)	อัตราค่าขนส่ง หน่วย THB/t_{Ash}/km
Wash Mill	บ่อล้างวัตถุดิบสำหรับใช้ผลิตปูนซีเมนต์
World Business Council Sustainable Development (WBCSD)	สภานักธุรกิจโลกเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน
Weight Average Cost of Capital (WACC)	ต้นทุนทางการเงินเฉลี่ยของเงินทุน
Wet Process	กระบวนการผลิตแบบเปียก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรียานุช แช่มศิริวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 2 เดือนตุลาคม พ.ศ.2533 ที่จังหวัดพัทลุง มีภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมยานยนต์ จากสถาบันเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น ในปีการศึกษา 2556 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาขั้นปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ในภาคปลาย ปีการศึกษา 2559

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University