

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

จากข้อมูลขยะมูลฝอยที่กล่าวถึงขั้นต้นแล้วในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุเชื้อเพลิง เทคโนโลยีไพโรไลซิส และการวิเคราะห์แบบเอ็กเซม แบ่งแต่ละหัวข้อดังนี้

2.1 ข้อมูลขยะทั่วประเทศ

เชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากขยะมูลฝอยโดยทั่วไปมักจะมี เศษอาหาร กระดาษ พลาสติก ใบไม้/กิ่งไม้ เป็นองค์ประกอบหลัก เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงแข็งสำหรับการเผาไหม้ คือ กระดาษ พลาสติก และใบไม้ ซึ่งจังหวัดเชียงใหม่ ปริมาณกระดาษ พลาสติกและ ไม้/ใบไม้ ที่ต้องทิ้งในปริมาณมากดังตารางที่ 2.1 และ C, H, O, N และ S ของเชื้อเพลิงแข็งแสดงดังนี้

ตารางที่ 2.1 สรุปรองค์ประกอบของขยะมูลฝอยและปริมาณมากที่สุดและน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นในจังหวัดเชียงใหม่

รายละเอียด	มากที่สุด	น้อยที่สุด
องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
— เศษอาหาร	50	20
— กระดาษ	17.75	5
— พลาสติก	13.82	6
— แก้ว	15	2
— โลหะ	2.45	1
— ยาง/หนัง	13	1
— ผ้า	3.33	1
— ไม้/ใบไม้	11.9	1.2
— กระเบื้อง	6.67	0.5
— อื่นๆ	6.67	1
ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น(กก./วัน)	250,000	1228
เกิดมูลฝอย(กก./คน/วัน)	1.46	0.3

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2545)

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ Primary และ Ultimate ของวัตถุดิบ

วัสดุ	Primary analysis					Ultimate analysis				
	M _{ad} (%)	A _{ad} (%)	V _{ad} (%)	FC _{ad} (%)	Q _{b,ad} (%)	C _{ad} (%)	H _{ad} (%)	N _{ad} (%)	S _{ad} (%)	O _{ad} (%)
Paper	10.25	2.09	74.45	13.21	32816.5	36.12	5.37	0.09	0.17	45.91
Paper-board	9.28	12.76	65.56	12.40	14074.8	38.6	4.90	0.21	0.17	34.08
Wood-chip	14.83	2.94	69.41	12.82	15855.5	40.32	4.68	0.18	0.06	36.99
Cotton cloth	5.14	0.79	86.94	7.13	15443.3	42.5	5.32	0.2	0.13	45.92
Vegetal	86.86	2.51	8.60	2.03	201.1	4.39	0.33	0.57	0.07	5.27
Orange hush	73.93	0.72	21.51	3.84	4759.5	13.42	1.88	0.35	0.02	9.68
PE plastic	0.17	0.06	99.77	0	37575.2	89.28	13.66	0.06	0.02	0
PVC plastic	0.28	14.95	64.88	19.89	15854.6	34.24	3.85	0.17	0.08	46.43*
Rubber	0.45	47.03	39.53	12.99	10001.6	25.22	2.45	0.14	0.19	24.52

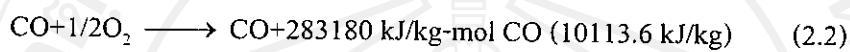
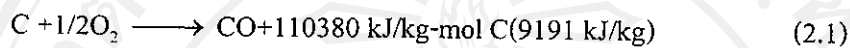
* Cl is also contain in this item

อ้างอิง: Li et.al.(1999)

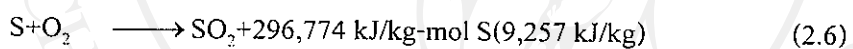
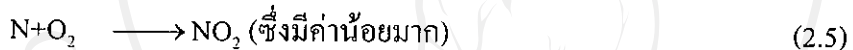
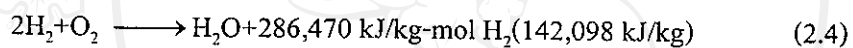
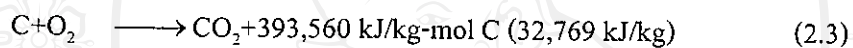
2.2 เทคโนโลยีไฟโรไลซิส

2.2.1 ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่งซึ่งปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกันกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับการ์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตัวอย่างการเผาไหม้มีดังนี้



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงอาจแสดงได้ดังนี้



นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาปลุกย่อยที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้อีกมากขึ้น



สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการเผาไหม้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพสูงเกิดในกรณีที่มีการเผาไหม้สมบูรณ์ส่วนในกรณีที่มีอากาศมากเกินไปในการเผาไหม้ ประกอบกับอุณหภูมิในการเผาไหม้สูงมากเกินไป ก็จะทำให้ไนโตรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์เปลี่ยนรูปไปเป็น ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) นอกจากนี้โลหะบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง เช่น เหล็กก็จะเกิดการเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์

การเผาไหม้จะเกิดได้ดีต้องมีสภาวะที่เหมาะสม นั่นก็คือต้องมีอากาศที่เพียงพอ มีอุณหภูมิสูงพอเวลาพอสำหรับปฏิกิริยา และมีการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดี ในการเผา

ใหม่เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ จึงต้องเพิ่มปริมาณอากาศขึ้นจนเพียงพอ ซึ่งได้อัตราส่วนตามทฤษฎี อากาศที่เกินจากที่ต้องการนั้นเรียกว่า อากาศมากเกินพอ(Excess Air) คำนวณได้จากสมการที่ 2.9

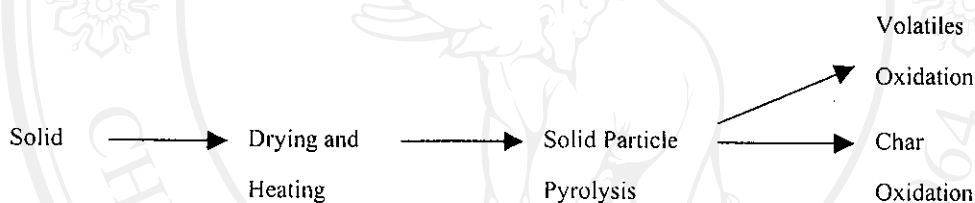
$$\text{excess air} = \frac{\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง}-\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}}{\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}} \quad (2.9)$$

สำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาขยะ ปฏิบัติการเผาไหม้ที่เกิदनับว่าเป็นกระบวนการที่อุณหภูมิสูงจากเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในเตา ความร้อนส่วนที่ผ่านเข้าสู่เชื้อเพลิงก็จะช่วยให้เกิดการลุกไหม้ (Ignition) ขึ้นในเชื้อเพลิงทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ ส่วนหนึ่งจะถูกสะสมอยู่ในก๊าซผลิตภัณฑ์ อีกส่วนหนึ่งจะถูกนำความร้อน พาคความร้อน และแผ่รังสีความร้อน เข้าสู่ผนังเตาและในการออกแบบเตาเผาขยะสิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือเวลาการเผาไหม้ (Time) อุณหภูมิการเผาไหม้ (Temperature) และระดับความปั่นป่วนในการคลุกเคล้ากันของสาร (Turbulence) เวลาในการเผาไหม้ในการออกแบบเตาเผาขยะจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องให้ขนาดของห้องเผาไหม้ก๊าซกว้างพอที่จะให้ก๊าซไอเสียมีเวลารับความร้อน และเผาไหม้ก๊าซพิษ และสารระเหยๆ ที่ยังเผาไหม้ไม่หมด อุณหภูมิของการเผาไหม้จะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ขึ้นในกองขยะเชื้อเพลิง และจะต้องทำให้ก๊าซไอเสียลอยออกทางปล่องควันได้ด้วย ในกรณีที่ขยะเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงและมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำ ก็อาจจำเป็นต้องให้ต้องให้ความร้อนช่วยทางหัวเผา และการออกแบบช่องผ่านของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ จะต้องออกแบบให้ก๊าซคลุกเคล้ากับอากาศเสริมส่วนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ในส่วนของกองขยะยังต้องออกแบบให้ขยะที่เผาไหม้สัมผัสกับอากาศได้อย่างสะดวก และมีพื้นที่สัมผัสมากที่สุด

2.2.2 กระบวนการไพโรไลซิส

2.2.2.1 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในไพโรไลซิส

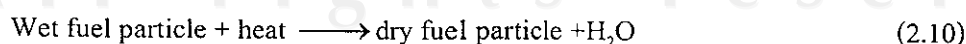
โดยทั่วไปไพโรไลซิสเป็นการให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงในอุปกรณ์ปิด หรือ การควบคุมอากาศในการเผาไหม้ให้น้อยลงทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเชื้อเพลิงแข็งสลายตัวทำให้เกิด สารระเหย น้ำมันดิน และ ถ่านชาร์ เป็นต้น โดยทั่วไปสามารถสรุปออกมาได้ 3 ขั้นตอนคือ การอบแห้งและการให้ความร้อน การไพโรไลซิสอนุภาคของแข็ง และการออกซิไดซ์ของสารระเหยและการออกซิไดซ์ถ่านชาร์ ขั้นตอนที่หนึ่ง การให้ความร้อนและอบแห้งเป็นการทำอนุภาค อนุภาคน้ำออกด้วยความร้อนจนถึงปฏิกิริยาไพโรไลซิส ขั้นตอนที่สองเป็นการไพโรไลซิสอนุภาค ของแข็งให้เกิดการปล่อยสารระเหยที่ไม่เผาไหม้และการสลายตัวของถ่านชาร์ ขั้นตอนที่สามเป็นการออกซิไดซ์ของการสารระเหยและคาร์บอนกลายเป็นถ่านชาร์ สามารถแสดงขั้นตอนต่างๆ ดัง รูปที่ 2.1 ดังนี้

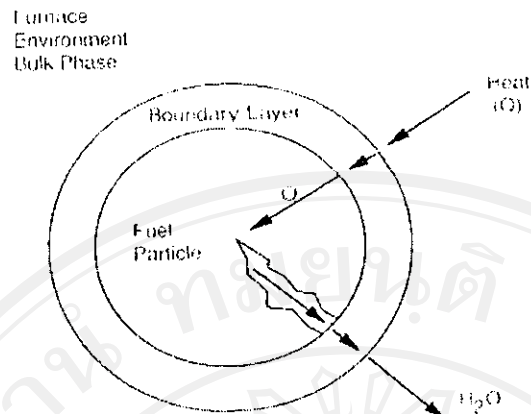


รูปที่ 2.1 แผนภูมิการเกิดเชื้อเพลิงแข็ง

(Tillman, 1991)

การอบแห้งและการให้ความร้อนแก่อนุภาค เป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการในการทำให้เกิด สารระเหย และ ถ่านชาร์ มีทั้งหมดสองกระบวนการคือ การให้ความร้อน และ การอบแห้งในอนุภาค กระบวนการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิงทำให้ของเหลวในรูพรุนถูกกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำออกจากอนุภาค ส่วนการอบแห้งอนุภาค เมื่อไอน้ำหลุดออกจากอนุภาคเชื้อเพลิงทำให้ความชื้นของอนุภาคลดลงปริมาณของอนุภาคเกิดการหดตัวซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังสมการที่ 2.10 และรูปที่ 2.2

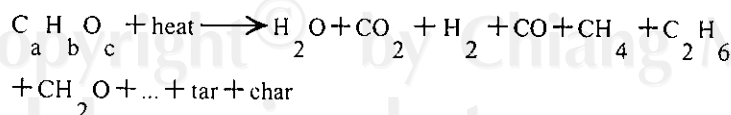




รูปที่ 2-2 แผนภูมิของขั้นตอนการระเหยของไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาค
(Tillman, 1991)

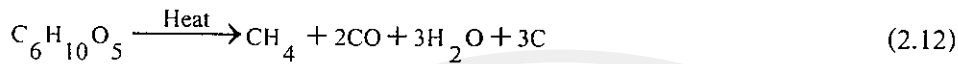
ความสัมพัทธ์จากกระบวนการเริ่มต้น การสลายตัวของอนุภาคที่เกิดจากของเหลวในรูปพรมุณูกระเหยออกไป ทำให้พรมุณมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีปริมาตรลดลง จึงเกิดการแตกร้าวภายใน ไอน้ำมีการเคลื่อนตัวจากภายในออกสู่ผิวด้านนอกของอนุภาค ค่าความดันภายในและภายนอกมีค่าใกล้เคียงกันจึงเกิดการสลายตัว ส่วนการแตกตัวของอนุภาคเกิดจากของเหลวได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็นไอน้ำฉับพลัน เกิดการเคลื่อนย้ายจากภายในอนุภาคออกสู่บริเวณผิวหน้าอย่างรวดเร็วความดันที่แตกต่างระหว่างภายในอนุภาคและบรรยากาศภายนอกอนุภาคเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคที่เล็กลง

เมื่อมีการใช้ความร้อนจนถึงปฏิกิริยาไพโรไลซิสกระบวนการนี้เป็นการเผาไหม้แบบไม่ใช้ออกซิเจนช่วยในการเผาจนเกิดปฏิกิริยาเอ็นโดเทอร์มิก สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.11 เชื้อเพลิงแข็งหนึ่งกิโลกรัมสามารถทำให้เกิดสารระเหยประกอบด้วย มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ ความชื้น ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์ และ มีเทน เป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการเผาไหม้ และตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาของกระดาดังสมการที่ 2.12

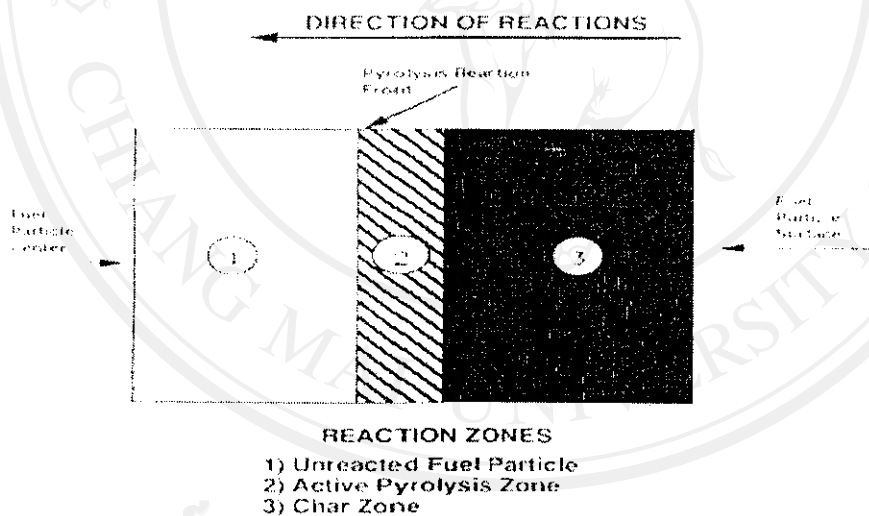


(2.11)

ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาของกระดาษ(Cellulose)



จะเห็นได้ว่าการไพโรไลซิสมีคุณสมบัติเฉพาะของปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน สามารถเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสโซนเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนย้ายอุณหภูมิจากผิวหน้าของอนุภาคเข้าสู่ศูนย์กลางของอนุภาคสามารถแบ่งการเกิดปฏิกิริยาในอนุภาคเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือบริเวณที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ส่วนที่สองคือ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส บริเวณนี้กำลังเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ส่วนที่สาม คือ ผิวหน้าของอนุภาคได้รับความร้อนและเกิดการระเหิดตัวของน้ำบริเวณผิวกลายเป็นไอน้ำหลุดออกจากอนุภาคและเริ่มมีการสลายตัวของอนุภาคกลายเป็นถ่านชาร์ บริเวณนี้บริเวณนี้เรียกว่า บริเวณการเกิดถ่านชาร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

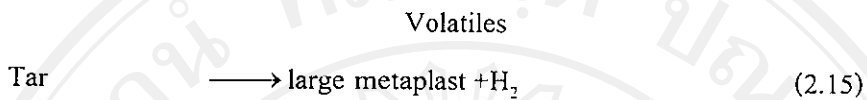
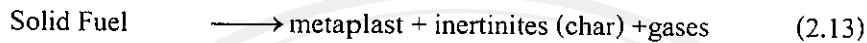


รูป 2.3 แผนภูมิกระบวนการเกิดปฏิกิริยาภายในอนุภาค

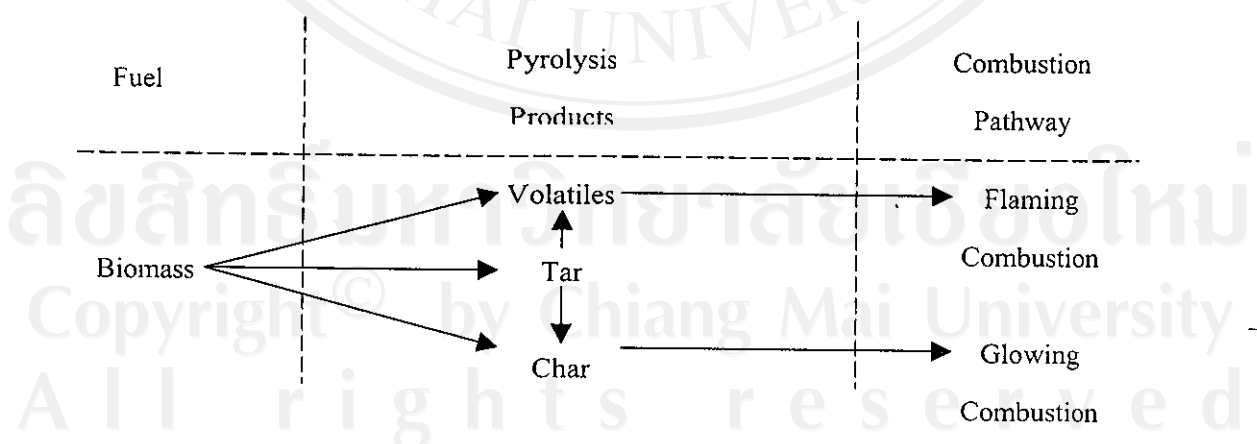
(Tillman, 1991)

ส่วนประกอบในกระบวนการไพโรไลซิสถูกจำแนกโครงสร้างสามารถอธิบายขั้นตอนดังนี้ ปฏิกิริยาเริ่มต้นเชื้อเพลิงแข็งได้รับความร้อนจนเกิดการสลายตัวและแตกตัวเป็นของเหลวขั้นสีด้า(Metaplast) ถ่านชาร์ และ สารระเหย ซึ่งของเหลวขั้นสีด้านี้สามารถแตกตัวและสลายตัวได้อีกครั้งเมื่อได้รับความร้อนจนสามารถเกิดปฏิกิริยา กลายเป็น น้ำมันดิน H_2 สารระเหยและน้ำ

จากน้ำมันดินสามารถแตกตัวกลายเป็น ของเหลวชั้นสีดำและไฮโดรเจน แสดงปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.13 ถึง 2.15 ดังนี้



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการไพโรไลซิสได้ 3 กลุ่มคือ สารระเหย น้ำมันดิน และ ถ่านชาร์ โดยที่กลุ่มที่หนึ่ง สารระเหยถูกผลิตโดยอนุภาคเชื้อเพลิงในไพโรไลซิสมีทั้งก๊าซที่ทำปฏิกิริยากันกับการรวมตัวของกลุ่มก๊าซของโมเลกุลหนักและโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งเกิดเป็นก๊าซ เนปทาเลิน(naphthalene) เอนเทซิน(anthracene) ฟลูออรีน(fluorine) และ ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ กลุ่มที่สอง น้ำมันดินเกิดขึ้นโดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มา ๆ ปฏิกิริยาอันดับสองสามารถแตกตัวเป็นหลายๆปฏิกิริยาหรือปฏิกิริยาต่อเนื่องจากปฏิกิริยาขั้นต้น สามารถทำให้เกิดสารระเหย และ ของเหลวชั้นสีดำ และกลุ่มสุดท้าย ถ่านชาร์ประกอบด้วยคาร์บอนคงตัวกับโมเลกุลที่ไม่หมดอย่างเช่นอะตอม ไฮโดรเจน ออกซิเจน และอะตอมแบบอื่นๆ มันเป็นการเพิ่มขนาดรูพรุน โครงสร้างแตกร้าวรูพรุนที่ชัดเจนจากอนุภาคฝุ่น และโครงสร้างรูพรุนคือพื้นฐานเกิดขึ้นเริ่มต้นการขยายรูพรุนในอนุภาคเชื้อเพลิงสำหรับบางเชื้อเพลิงบางชนิด เมื่อมีการเผาไหม้จะเกิดการลุกไหม้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบจำลองกระบวนการเกิดไพโรไลซิสและการเผาไหม้โดย Shafizadeh (Tillman ,1991)

การรวมตัวของสารระเหยของโมเลกุลหนักและโมเลกุลเบาสามารถดองค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นจากขบวนการไพโรไลซิส

	อุณหภูมิไพโรไลติก, °C(°F)			
	482 (900)	649 (1200)	816 (1500)	926 (1700)
ส่วนประกอบของก๊าซ, % โดยปริมาตร				
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	33.6	30.5	34.1	35.3
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	44.8	31.8	20.6	18.3
ไฮโดรเจน (H ₂)	5.6	16.5	28.6	32.4
มีเทน (CH ₄)	12.5	15.9	13.7	10.5
อีเทน (C ₂ H ₆)	3.0	3.1	0.8	1.1
อีธีลีน (C ₂ H ₄)	0.5	2.2	2.2	2.4
Heating value(HHV), Btu/st ft ³	312	403	392	385

ที่มา : Calvin (1996)

2.3 การวิเคราะห์แบบเอ็กแซม

2.3.1 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี (Exergy Analysis)

การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี (Exergy Analysis) หรือการวิเคราะห์อะเวลละบิลิตี (Availability Analysis) คือ การวิเคราะห์งานที่นำไปใช้ประโยชน์(Useful work) ที่ระบบสามารถกระทำสู่สิ่งแวดล้อมที่ความดัน P_0 และ อุณหภูมิ T_0 โดยปรกติแล้วสิ่งแวดล้อม (Surrounding) หมายถึง ทุกสิ่งทุกอย่างที่อยู่รอบระบบ (System)ที่กำลังพิจารณาและสิ่งแวดล้อมเป็นส่วนหนึ่งของระบบข้างเคียง (Environment) ซึ่งหมายถึงบรรยากาศรอบ ๆ ของโลก ระบบข้างเคียงนี้ถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ จนถึงได้ว่าอุณหภูมิและความดัน T_0 และ P_0 ตามลำดับมีค่าคงที่ เมื่อคุณสมบัติต่างๆของระบบที่พิจารณาอยู่ในสภาวะสมดุลกับระบบข้างเคียง สภาวะดังกล่าวของระบบจะมีความดัน P_0 อุณหภูมิ T_0 ไม่มีการแลกเปลี่ยนงานและความร้อนระหว่างระบบข้างเคียง สภาวะดังกล่าวของระบบเรียกว่าสภาวะตาย (Dead state)

ประโยชน์วิธีการคำนวณด้วยการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีสามารถหาตำแหน่ง สาเหตุ และขนาดที่แท้จริงจากแหล่งพลังงานที่เปล่าประโยชน์และการสูญเสีย เพื่อนำมาตัดสินใจจากข้อมูลนี้สามารถใช้ในการออกแบบนี้ของประสิทธิภาพพลังงานแบบใหม่ สำหรับการปรับปรุงสมรรถนะ

ของระบบเดิม การนำเอ็กเซอร์จีมารวมกับหลักการของเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ทำให้รู้ถึงเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้ทราบถึงราคาที่แท้จริงที่ส่วนประกอบต่างๆ ที่เป็นตัวแสดงคุณค่าของราคาลงทุนเบื้องต้น ราคการปฏิบัติการและการบำรุงรักษา และ ราคาที่รวมอยู่ในกาสูญเสียและการสูญเสียของเอ็กเซอร์จี

การศึกษาของการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีและเทอร์โมไดนามิกส์ถูกรวบรวมโดย Bejan et al.(1996) . Moran (1989) โดยสรุปได้ดังนี้ เอ็กเซอร์จีสามารถถูกถ่ายทอดได้โดยทั้งหมด 3 แบบด้วยกันคือ การมีรวมเอ็กเซอร์จีกับงาน (Works) การมีรวมเอ็กเซอร์จีกับการถ่ายเทความร้อน และการรวมเอ็กเซอร์จีกับมวล หรือ อนุภาค จากปริมาตรควบคุมทุกการถ่ายทอดแต่ละอย่างเป็นการประเมินความสัมพันธ์จนถึงสิ่งแวดล้อมใช้ค้นหาเอ็กเซอร์จี การสมมูลเอ็กเซอร์จีสามารถเขียนหลากหลายรูปแบบ หรือไม่ก็เกิดขึ้นในระบบปิด หรือภายใต้สภาวะปริมาตรควบคุม สภาวะสม่ำเสมอ หรือปฏิกิริยาช่วงสั้นๆ เป็นสิ่งที่น่าสนใจ อนึ่งที่สำคัญคือการพัฒนาที่กว้างขวางสมมูลอัตราเอ็กเซอร์จีสำหรับปริมาตรควบคุมที่สภาวะสม่ำเสมอ

สมมูลอัตราเอ็กเซอร์จีในปริมาตรควบคุม (Control Volume)

$$0 = \frac{\sum \dot{E}_{q,i} - \dot{W}_{CV} + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e}{\text{rates of exergy transfer}} - \frac{\dot{E}_D}{\text{rates of exergy distiction}} \quad (2.16.a)$$

หรือ

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D \quad (2.16.b)$$

อัตราเข้ารวมกับการถ่ายเทความร้อน

$$\dot{E}_{q,i} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j \quad (2.17)$$

โดยที่

$\dot{Q}_j$ คือ อัตราเวลาการถ่ายเทความร้อนที่ระบบในสิ่งแวดล้อมรอบปริมาตรควบคุม

สำหรับพลังงานสมมูลอัตราปริมาตรควบคุมตัวแปร i และ e แสดงสถานะทางเข้าและทางออก ตามลำดับ อัตราการถ่ายเทเอ็กเซอร์จีที่ปริมาตรควบคุม ทางเข้าและทางออกเป็นตัวแปรการบ่งชี้ตามลำดับ ซึ่ง $\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i$ และ $\dot{E}_e = \dot{m}_e e_e$ การนับ $\dot{E}_D$ อัตราเวลาจากการลดเอ็กเซอร์จี เกิดการย้อนกลับข้างในปริมาตรควบคุม

2.3.1.1 การหาส่วนประกอบของเอ็กเซอร์จี

การศึกษาหาสภาพการทำงานที่เหมาะสมในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ของอากาศพลังงานที่เข้าเพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ จะเป็นแนวทางการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของพลังงาน ค่าเอ็กเซอร์จีเป็นค่าในรูปแบบของงานโดยมีการปรับเทียบกับสถานะที่สสารคงที่ เป็นระบบปิด แยกจากสิ่งแวดล้อม ที่ 25°C (298 K) นั่นคือสถานะตาย (Dead state) สามารถคำนวณจากสมการ Moran *et al.* (1993)

$$\dot{E} = \dot{m}((H - H_{\text{at}298\text{K}}) - T_0(s - s_{\text{at}298\text{K}})) \quad (2.18)$$

โดยที่

H คือค่าเอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)

S คือค่าเอนโทรปีจำเพาะ (kJ/kg K)

T_0 คืออุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส (298 K)

2.3.1.2 ส่วนประกอบของเอ็กเซอร์จี (Exergy Component)

ส่วนประกอบของเอ็กเซอร์จีเป็นผลรวมมาจาก พลังงานกายภาพ พลังงานการเคลื่อนไหวย พลังงานแฝง และ พลังงานเคมีรวมกันสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.19 จาก Ahern (1921)

$$E = E^{\text{PH}} + E^{\text{KN}} + E^{\text{PT}} + E^{\text{CH}} \quad (2.19)$$

โดยที่

E^{PH} = เอ็กเซอร์จีกายภาพ (physical exergy)

E^{KN} = เอ็กเซอร์จีจลน์ (kinetic exergy)

E^{PT} = เอ็กเซอร์จีศักย์ (potential exergy)

E^{CH} = เอ็กเซอร์จีเคมี (chemical exergy)

2.3.1.3 การหาค่าเอ็กเซอร์จีกายภาพ (Exergy Physical)

การหาค่าเอ็กเซอร์จีกายภาพ จากระบบปิดที่สถานะที่กำหนดสามารถให้สูตรดังนี้

$$E^{PH} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.20)$$

หรือ

$$e^{PH} = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.21)$$

โดยที่

U = พลังงานภายในจุดที่กำหนด (Internal energy)

V = ปริมาตรจุดที่กำหนด (Volume)

S = เอนโทรปีจุดที่กำหนด (entropy)

U_0 = พลังงานภายในที่ dead state

V_0 = ปริมาตรที่ dead state

S_0 = เอนโทรปีที่ dead state

กรณีที่เป็น Ideal-gas

$$E^{PH} = \dot{m} T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.22)$$

2.3.1.4 การหาค่าเอ็กเซอร์จีด้านเคมีมาตรฐานจากเชื้อเพลิง (Standard Chemical Exergy of Fuel)

เอ็กเซอร์จีด้านเคมีมาตรฐานสำหรับเชื้อเพลิงจากแร่ธาตุไม่ปรากฏในสิ่งแวดล้อมสามารถเปรียบเทียบโดยการพิจารณาปฏิกิริยาอุดมคติจากสารประกอบกับสารประกอบอื่นๆ สำหรับขณะปฏิกิริยาเอ็กเซอร์จีด้านเคมี เป็นการอธิบายสำหรับหัวข้อการใช้ไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์จากเชื้อเพลิง C_xH_y ที่ T_0 , P_0 อ้างอิงถึงระบบที่มีปฏิกิริยาเชื้อเพลิงกับออกซิเจนถึงปฏิกิริยาจากคาร์บอนไดออกไซด์ กับ ของเหลวทุกส่วนประกอบ ซึ่งมีการสมมูลวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ โดยไม่การคืนสู่ภาวะสมดุลและการถ่ายเทความร้อนดังสมการ

ซึ่งสามารถใช้สมการก๊าซ และ ก๊าซผสม พลังงานมาตรฐาน โดยใช้วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบการหาค่าเอ็กเซอร์จีเคมี (Chemical Exergy) สำหรับ ถ่านหิน ฟืน และน้ำมันเชื้อเพลิง

$$e_{DAF}^{CH} = (HHV)_{DAF} - T_0 \left[s_{DAF} + \nu_{O_2} \bar{s} - \sum_{\text{product}} \nu_{\text{product}} \bar{s} \right] \quad (2.23)$$

2.3.1.5 เอ็กเซอร์จีจิ้น (Kinetic exergy)

ซึ่งสามารถหาค่า E^{KN}

$$E^{KN} = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.24)$$

โดยที่ค่า

V = ความเร็วที่จุดกำหนด

2.3.1.6 เอ็กเซอร์จีจิ้น (Potential exergy)

และสามารถหาค่า E^{PT}

$$E^{PT} = m g Z \quad (2.25)$$

โดยที่ค่า

Z = ความสูง

2.3.1.7 การสมดุลเอ็กเซอร์จีในกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

ซึ่งเป็นการรวมสมดุลพลังงานและเอนโทรปีเข้าด้วยกันสามารถแสดงได้ดังสม

การ

$$\sum (E_x)_i = \sum (E_x)_o \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$\sum (E_x)_i = (E_x)_{i,f} + (E_x)_{i,w}$$

$$\sum (E_x)_o = (E_x)_{o,g} + (E_x)_{o,c} + (E_x)_{o,t} + (E_x)_{o,w} + (E_x)_{o,a} + (E_x)_{o,l} + (E_x)_{o,d}$$

โดยที่

$(E_x)_{o,d}$ คือ พลังงานที่สูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ที่เกิดขึ้นในระบบ เครื่อง

จักร การถ่ายเทความร้อน ถ่ายเทมวล และการย้อนกลับไม่ได้ของระบบ

2.3.1.8 การคำนวณเอนโทรปี และเอนทัลปีสำหรับของแข็ง

จากโครงสร้างที่ซับซ้อนของวัสดุคิบ,ชีวมวล, สามารถประมาณจากองค์ประกอบ และส่วนประกอบได้ดังนี้

$$E_{Hs} = 4.1868 \{ (1 + 0.15[O])(7837.667[C] + 33888.889[H] - [O]/8) \} \quad (2.27)$$

$$E_{Xs} = 4.1868 \{ 8177.79[C] + 5.25[N] + 27892.63[H] - 3173.66[O] + 0.15[O](7837.667[C] + 33888.889[H] - 4236.1[O]) \} \quad (2.28)$$

2.3.1.9 การคำนวณเอนโทรปี และเอนทัลปีสำหรับของแก๊ส

$$E_H = E_{Hs} + \int_{T_s}^T C_p dT \quad (2.29)$$

$$E_x = E_{xs} + \int_{T_s}^T C_p \left(1 - \frac{T_d}{T} \right) dT \quad (2.30)$$

โดยที่

$$C_p \text{ หาจาก } EH = a + bT + cT^2 + dT^3$$

2.3.2 การวิเคราะห์พลังงาน(Energy Analysis)

การปรับปรุงการใช้กฎเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่หนึ่งนำการสมดุลและอนุรักษ์พลังงานมาใช้แสดงได้ดังสมการ

$$\sum E_i = \sum E_o \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$\sum E_i = E_{i,f} + E_{i,w} \quad (2.32)$$

$$\sum E_o = E_{o,g} + E_{o,c} + E_{o,t} + E_{o,w} + E_{o,a} + E_{o,l} \quad (2.33)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.3 การวิเคราะห์มวล(Mass Analysis)

การสมดุลมวลในระบบปิด(Mass balance closure:MBC) อัตราส่วนของมวลของสิ่งที่ออกมาและสิ่งที่ใส่เข้าไปถูกรวมในการวิเคราะห์ในส่วนประกอบต่างในการวิเคราะห์ ซึ่งในส่วนประกอบทางเคมีรวมทั้งหมดในปฏิกิริยา สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\sum M_i = \sum M_o \quad (2.34)$$

เมื่อ

$$\sum M_i = M_{i,f} + M_{i,a} + M_{i,w} \quad (2.35)$$

$$\sum M_o = M_{o,g} + M_{o,c} + M_{o,t} + M_{o,w} + M_{o,l} \quad (2.36)$$

2.3.4 การวิเคราะห์ต้นทุน(Exergy Cost)

การใช้ต้นทุนในการเข้ามีส่วนร่วมในด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีจากระบบหนึ่งๆที่สถานะสม่ำเสมอต้องมีจำนวนของวัตถุดิบที่ใส่เข้าไปและผลิตภัณฑ์ที่ออกมา ต้นทุนที่เกิดจากค่าความร้อนกับงานที่เกิดขึ้นปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม การรวมตัวของพลังงาน และ เอ็กเซอร์จีจากมวลสารเป็นการเป็นการถ่ายเทของวัตถุดิบที่ใส่เข้าไป แลผลิตภัณฑ์ที่ออกมา รวมทั้งการสูญเสียเอ็กเซอร์จี โดยการย้อนกลับในระบบ ตั้งแต่ถูกวัดถึงค่าเทอร์โมไดนามิกส์ ผลกระทบและราคาต้นทุนเป็นพื้นฐานของการระบุราคาตามท้องตลาดตามมูลค่าของพลังงานทั่วไป ซึ่งมีความหมายว่าการใช้พลังงานและเอ็กเซอร์จีเป็นพื้นฐานในการระบุราคาในการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมรวมทั้งการหมดประสิทธิภาพในระบบถ่ายเทเข้า ระบบออก กำลังและการถ่ายเทความร้อน สามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i = c_i (\dot{m}_i e_i) \quad (2.37)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}_e = c_e (\dot{m}_e e_e) \quad (2.38)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{w} \quad (2.39)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}_q = c_q (\dot{m}_q e_q) \quad (2.40)$$

โดยที่

$\dot{C}_i$ คือ ราคาของวัตถุดิบที่ใส่เข้าไปในระบบ

$\dot{C}_e$ คือ ราคาผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากระบบ

$\dot{C}_w$ คือ ราคาของงานที่ใส่เข้าไปในงานของระบบ

$\dot{C}_q$ คือ ราคาของค่าความร้อนภายในระบบ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved