สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ง

สารบัญ ..... จ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ณ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ถ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 5

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 5

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 8

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 9

2.1 บทนำ 9

2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับขยะมูลฝอย 9

2.2.1 สถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทย 11

2.2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอย 12

2.2.3 ลักษณะสมบัติขยะมูลฝอยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 18

2.2.3.1 ความหนาแน่น 18

2.2.3.2 องค์ประกอบโดยน้ำหนัก 18

2.2.3.3 ลักษณะทางกายภาพ 19

2.2.3.4 ลักษณะสมบัติทางเคมี 19

2.2.3.5 ลักษณะสมบัติทางเคมี ค่าความร้อนของขยะมูลฝอย 19

2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะ 19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel) 20
2.4.1 มาตรฐานการแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) 22
2.4.2 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel production) 23
2.4.2.1 Mechanical Biological Treatment plant (MBT) 23
2.4.2.2 Autoclaving RDF Plant 24
2.4.3 หน่วยปฏิบัติการในกระบวนการผลิต RDF 24
2.4.3.1 การคัดแยกด้วยแรงงานคน 24
2.4.3.2 การลดขนาด (Size reduction) 24
2.4.3.3 การร่อน (Screening) 25
2.4.3.4 การคัดแยกโดยใช้อากาศ (Air separation) 26
2.4.3.5 การแยกโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic separation) 26
2.4.3.6 การอบแห้งและทำให้แน่น 26
2.4.4 การใช้ประโยชน์ RDF ไปใช้งานและการควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม 27
2.4.4.1 การใช้ประโยชน์จาก RDF 27
2.4.4.2 การควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม 27
2.4.5 เทคโนโลยีการบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพและเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) 28
2.5 เทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย (Incineration) 31
2.5.1 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย 32
2.5.2 ประเภทของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย 32
2.5.3 การนำพลังงานกลับมาใช้ (Energy Recovery) 34
2.5.4 การควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม 35
2.5.4.1 มลพิษอากาศ 35
2.5.4.2 มลพิษกากของแข็ง 35
2.5.4.3 มลพิษน้ำ 36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 เทคโนโลยีไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชั่น (Pyrolysis / Gasification) 36
2.6.1 ปฏิกิริยาอุณหเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น 37
2.6.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Type of gasifier) 40
2.6.3 คำจำกัดความของทาร์ (Definition of Tars) 42
2.6.4 แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรดิวเซอร์แก๊ส 43
2.6.5 การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง 43
2.6.5.1 พลังงานความร้อนตรง 44
2.6.5.2 วัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี 44
2.6.5.3 การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน 44
2.6.6 มลพิษและของเสียที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น 46
2.6.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น 49
2.7 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อน 50
2.7.1 พลาสมาเชิงความร้อน (Thermal plasma) 51
2.7.2 ประเภทของหัวพลาสมาอาร์ค 53
2.7.2.1 Non-transferred arc 53
2.7.2.2 Transferred arc 55
2.7.3 การนำพลังงานกลับมาใช้ 56
2.7.4 การควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม 56
2.7.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 57
2.7.5.1 ระบบ Plasma gasification melting process 57
2.7.5.2 ระบบ Plasma สำหรับ External energy หรือ Allothermal 60
2.7.5.3 ระบบ Plasma-assisted gasification 60
2.7.6 ความก้าวหน้าของการพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนในต่างประเทศ 61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.6.1 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Europlasma 62
2.7.6.2 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Plasco 63
2.7.6.3 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Alter NRG/Westinghouse Plasma coperation 64
2.7.6.4 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท InEnTec 66
2.8 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จากวิธีทางสถิติ 68
2.8.1 การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) 68
2.8.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Componance Analysis : PCA) 69
2.9 สรุปความสำคัญของปัญหานำการวิจัย 71
3 เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย 74
3.1 บทนำ 74
3.2 ขั้นตอนการวิจัย 75
3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย 77
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัย 77
3.3.1.1 การเตรียมขยะชุมชนสำหรับเป็นเชื้อเพลิงขยะในงานวิจัย 77
3.3.1.2 การเตรียมเชื้อเพลิงขยะแบบอัดแท่ง (RDF-5) 78
3.3.2 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง 81
3.3.2.1 การเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิง 81
3.3.2.2 การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพ 82
3.3.2.3 การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) 82
3.3.2.4 การศึกษาสมบัติทางเคมี (Chemical composition) 83
3.3.3 การพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชั่นสำหรับใช้กับพลาสมาอาร์คเชิงความร้อน 84
3.3.3.1 พลาสมาเชิงความร้อนขนาดกำลัง 50 กิโลวัตต์ 84
3.3.3.2 การพัฒนาเตาปฏิกรณ์ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 90
3.3.3.3 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชั่น และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 94
3.3.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ 97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะRDF-5 กับระบบแก๊สซิฟิเคชั่น 99
3.3.5 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น (P-G) 104
3.3.6 การศึกษาการกำจัดเศษมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ควบคู่กับการผลิตพลังงานโดยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น (P-G) 106
3.3.7 การประเมินสมรรถนะระบบ/ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน 107
3.3.8 ประเมินสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมของระบบ 109
3.3.8.1 การศึกษาปริมาณและสมบัติของของเสียที่เกิดขึ้นจากระบบ 109
3.3.8.2 การศึกษาสมรรถนะด้านสิ่งแวดล้อม 110
3.3.9 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ทางสถิติ 112
3.3.9.1 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 112
3.3.9.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชั่น 114
3.3.9.3 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 115
3.3.9.4 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบ 115
4 ผลการทดลอง 117
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิง 117
4.1.1 การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-5) 117
4.1.1.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-5) 117
4.1.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง 122
4.1.2 การศึกษาสมบัติของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) 126
4.1.2.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) 126
4.1.2.2 การศึกษาการย่อยสลายทางความร้อน (TGA) ของ Waste reject 127
4.1.2.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) 127

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบแก๊สซิฟิเคชั่น 129
4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) 130
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง 133
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น 138
4.2.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency) 139
4.3 ผลการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น (P-G) 140
4.3.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) 141
4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง 142
4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบสมถรรนะการผลิตพลังงานระบบแก๊สซิฟิเคชั่น (C-G) กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น (P-G) 143
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพผลิตพลังงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นต่อการกำจัด Waste reject ที่มีความชื้นระดับต่างๆ 145
4.5.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) 145
4.5.2 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง 147
4.5.3 การประเมินสมรรถนะของระบบ 148
4.5.4 ปริมาณทาร์และฝุ่น 149
4.6 ผลการศึกษาสมรรถนะทางด้านสิ่งแวดล้อม 151
4.6.1 ผลการศึกษาสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมระบบ C-G กับ ระบบ P-G 151
4.6.1.1 มลสารในแก๊สเชื้อเพลิง 151
4.6.1.2 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน 154
4.6.1.3 สารมลพิษอื่นๆ ในรูปน้ำเสีย 154
4.6.2 ผลการศึกษาสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นต่อการกำจัด Waste reject ที่มีความชื้นระดับต่างๆ 157
4.6.2.1 มลสารในแก๊สเชื้อเพลิง 157

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.2.2 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน 159
4.6.2.3 สารมลพิษอื่นๆ ในรูปน้ำเสีย 161
4.6.3 วิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อม 162
4.6.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ PCA เปรียบเทียบระบบ C-G และ P-G 162
4.6.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ PCA สำหรับปัจจัยความชื้นเชื้อเพลิงกับระบบ P-G 165
4.6.4 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากเถ้า 167
4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินระบบ 168
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 174
5.1 สรุป 174
5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ 178
5.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต 180
รายการอ้างอิง 182
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ 192
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 204
ประวัติผู้เขียน 218

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ชนิดของขยะที่แบ่งตามองค์กร APWA ในสหรัฐอเมริกา 10
2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยชุมชนทั่วประเทศไทย โดยแบ่งออกเป็น 10 ประเภท..... 13
2.3 ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทั่วๆ ไป 13
2.4 ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทั่วๆ ไป 14
2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของขยะชุมชนโดยทั่ว ๆ ไป..... 14
2.6 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย..... 15
2.7 คุณสมบัติของขยะมูลฝอยในประเทศไทย..... 17
2.8 การจัดประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ประเภทต่าง ๆ..... 22
2.9 ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท..... 33
2.10 สรุปประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ 35
2.11 ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 42
2.12 ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง..... 46
2.13 ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง 47
2.14 ระบบพลาสมาอาร์คกับระบบแบบแก๊สซิฟิเคชั่นเพื่อใช้ทำลายขยะอันตรายและ
ขยะพิษ (Plasma gasification melting process) 58
2.15 เทคโนโลยีพลาสมาเป็นความร้อนภายนอก (External energy หรือ Allothermal)
สำหรับระบบทางความร้อนแบบต่างๆ..... 60
3.1 ข้อมูลหน่วยการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงแข็ง โดยใช้เครื่อง Pelleting Machine..... 79
3.2 คุณลักษณะหัวพลาสมาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้..... 84
3.3 แสดงถึงพารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบ..... 98
3.4 ชุดการทดลองการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานกับระบบ C-G..... 101
3.5 การกำหนดความชื้นของ Waste reject ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ 106
3.6 พารามิเตอร์สารมลพิษในรูปต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้..... 109
3.7 ข้อมูลพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชั่น 114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

3.8 ข้อมูลพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 115
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ 118
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง 119
4.3 ผลการศึกษาสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง 122
4.4 มาตรฐานของเชื้อเพลิงขยะประเภท 3 (RDF-3) อ้างอิงจาก SCIeco Services Co.,Ltd 125
4.5 องค์ประกอบต่างในมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) 126
4.6 ผลการศึกษาสมบัติของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) 129
4.7 ผลของการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ C-G 135
4.8 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G 140
4.9 การเปรียบเทียบสมถรรนะการผลิตพลังงานระหว่างระบบ C-G และ P-G 144
4.10 การประเมินสมรรถนะของระบบ P-G ในการกำจัด Waste reject 150
4.11 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง 153
4.12 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในระบบ C-G 154
4.13 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในระบบ P-G 155
4.14 อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย 157
4.15 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง 158
4.16 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 10 %,wb) 159
4.17 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 25%,wb) 160
4.18 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 40%, wb) 160
4.19 อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย 162

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.20 ปัจจัยน้ำหนัก (Factor loading) ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีน 164
4.21 ปัจจัยน้ำหนัก (Factor loading) ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีนในวัตถุดิบ Waste reject ที่ความชื้น 10, 25 และ 40% (wb) 165
4.22 ผลทดสอบการการชะลายของเถ้า ของเชื้อเพลิง RDF-5/WC(70/30) เปรียบเทียบระบบ C-G และ P-G 167
4.23 ผลทดสอบการชะลายของเถ้า Waste reject ของ Waste reject ที่ความชื้นต่างๆ 168
4.24 ตัวแปรอิสระจากองค์ประกอบแบบแยกธาตุกับลักษณะการเดินระบบ ที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 168
4.25 ตัวแปรอิสระจากองค์ประกอบแบบประมาณกับลักษณะการเดินระบบ ที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 169
4.26 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สโดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบประมาณของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) (N = 27) 169
4.27 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สโดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) (N = 27) 170
4.28 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิง RDF-5/ WC (70/30) 172

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.29 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนาย
คุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากองค์ประกอบแบบแยกธาตุ
ของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) 171
4.30 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและ
ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สโดยใช้ค่าความชื้นของ Waste reject (N = 36)..... 172
4.31 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนาย
คุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากความชื้นของ Waste reject 172

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ข้อมูลสถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยจาก ปี 2551 – 2555 11
2.2 องค์ประกอบขยะชุมชนเฉลี่ยทั่วประเทศไทย (ที่มา:กรมควบคุมมลพิษ, 2547) 12
2.3 ขั้นตอนในการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Diaz et al., 2006) 21
2.4 ผังการทำงานของกระบวนการทางกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological 23
2.5 ความต้องการพลังงานจำเพาะของการลดขนาดของเสียจากชุมชน 25
2.6 กระบวนการทำงานของ ต้นแบบเทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร (มทส.) 30
2.7 อุปกรณ์และเครื่องจักรต้นแบบเทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร 31
2.8 กระบวนการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อน (Medcalf et al., 1998) 32
2.9 ปฏิกิริยาอุณเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง 37
2.10 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (วีรชัย อาหาญ และคณะ, 2551) 40
2.11 ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (ที่มา : Nowell, 1999) 44
2.12 สภาวะของพลาสมา (ที่มา : The recovered energy system, Online) 52
2.13 นอนทราสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Non-transferred plasma arc) 54
2.14 หัวพลาสมาจากบริษัท Europlasma 54
2.15 ทราสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Transferred arch torch) 55
2.16 ลักษณะของ Slag melting ในเตาปฏิกรณ์พลาสมา (ที่มา : Moustakas, 2005) 57
2.17 เตาแบบ Auto-thermal gasifier (Europlasma) 63
2.18 แผนผังของ Plasco conversion process 64
2.19 หัวพลาสมาอาร์คแบบนอนทรานสเฟอร์ของ WPC 64
2.20 เตาพลาสมาแก๊สซิไฟเออร์ ของ Alter NRG 65
2.21 ระบบของเตาเผาแบบ Plasma Enhanced Melter (InEnTec) 66
3.1 ขั้นตอนในงานวิจัย 75
3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์เชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้ 77
3.3 เครื่อง Pelletizing machine สำหรับเตรียมเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) 79
3.4 แผนผังของหัวพลาสมาอาร์ค (plasma arc torch) 86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.5 ชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า 86
3.6 ลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า 87
3.7 Plasma Jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา 87
3.8 ลักษณะชุดครอบหัวพลาสมา (Plasma Jacket) 88
3.9 แผนผังอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค 88
3.10 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค 89
3.11 ลักษณะของเตา Gasification และPlasma-assisted gasification 90
3.12 แผนผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 91
3.13 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชั่นและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 93
3.14 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชั่น และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น 96
3.15 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา (T_1 –T_6) 97
3.16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัด 99
3.17 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานของระบบ C-G 101
3.18 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานกับระบบ P-G 105
3.19 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ 113
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ RDF-3, RDF-4 และ RDF-5 118
4.2 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงต่าง ๆ 120
4.3 ผลการวิเคราะห์ TGA ของเชื้อเพลิงไม้สับ และเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 120
4.4 ลักษณะทางกายภาพของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) และผลวิเคราะห์ TGA 126
4.5 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) 132
4.6 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 210 Nm^3/hr 137
4.7 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับ 210 Nm^3/hr 137
4.8 ลักษณะของพลาสมาอาร์คและอุณหภูมิจากพลาสมาที่การเดินระบบ 36 kW 141
4.9 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) 142
4.10 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G 143

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.11 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของ Waste reject 146
4.12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีน 164
4.13 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีนในวัตถุดิบ Waste reject ที่ความชื้น 10 25 และ 40% (wb) 166