การศึกษาการเผาไหม้กากตะกอนจากกระบวนการผลิตกระดาษ

เรือเอก ธนพงษ์ สุริเย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2437-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21049464

A STUDY OF INCINERATION OF SLUDGE FROM PAPER MANUFACTURING PROCESS

Lt.Thanapong Suriyea

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2002

ISBN 974-17-2437-3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเผาไหม้กากตะกอนจากกระบวนการผลิตกระดาษ
โดย	เรือเอก ธนพงษ์ สุริเย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กุณฑินี มณีรัตน์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนพงษ์ สุริเย เรือเอก : การศึกษาการเผาไหม้กากตะกอนจากกระบวนการผลิตกระดาษ. (A STUDY OF INCINERATION OF SLUDGE FROM PAPER MANUFACTURING PROCESS) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 127 หน้า. ISBN 974-17-2437-3

การกำจัดกากตะกอนจากกระบวนการผลิตกระดาษเริ่มจากการอบกากตะกอนให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น ในการทดลองครั้งนี้กากตะกอนที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะมีความชื้นเหลืออยู่ 15% หลังจากนั้นนำกากตะกอนที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาทำการบดเพื่อลดขนาดของอนุภาคลงให้เหลือประมาณ 2-3 มิลลิเมตร จากนั้นนำกากตะกอนดังกล่าวไปเผาในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้ทรายเป็นเบด พบว่าสามารถเผากากตะกอนได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 850-950 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วของอากาศในช่วง 0.13-0.19 เมตร/วินาที หรือประมาณ 1.05-1.50 เท่าของความเร็วต่ำสุด ในการเกิดฟลูอิดไดเซชั่นและมีอัตราส่วนอากาศต่อกากตะกอน 2.55:1-3.72:1 อุณหภูมิก๊าซเสียที่ออกมาจากการเผาไหม้อยู่ในช่วง 446-651 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพที่ได้จากการเผากากตะกอนดังกล่าวอยู่ในช่วง 84.93-90.03 % ความร้อนของก๊าซเสียที่ได้จากการเผาไหม้อาจจะนำกลับไปอบแห้งกากตะกอนและอาจนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2545	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	—

4370319121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: Sludge Incineration

Lt.THANAPONG SURIYEA. THESIS TITLE : A STUDY OF INCINERATION OF SLUDGE FROM PAPER MANUFACTURING PROCESS. THESIS ADVISOR : MINGSAK TANGTRAKUL., 127 pp. ISBN 974-17-2437-3

In this research, the combustion of sludge from paper manufacturing process in fluidized bed furnace was experimented.Dry sludge to decrease moisture to 15%.Crush dry sludge for minimum size of 2-3 mm.The combustion of dry sludge in fluidized bed of sand bed.The result of research shows that the combustion efficiency of sludge is in range of 84.93-90.03% for air velocity is in range of 0.13-0.19 m/s with air/fuel ratio is in range of 2.55:1-3.72:1 combustion temperature in the bed is in range of 850-950 °C and flue gas is in range of 446-651 °C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department	Mechanical Engineering	Student's signature	
Field of study	Mechanical Engineering	Advisor's signature	
Academic year	2002	Co-advisor's signature	—

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่านดังนี้ นางระเบียบ สุริเย มารดาผู้ซึ่งให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งในด้านค่าใช้จ่ายและกำลังใจอย่างมากในการทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้ช่วยศาสตราจารย์มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างยิ่ง รวมทั้งจัดหาเงินทุนสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ทุกอย่าง รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์ อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ ดร.กุณฑินี มณีรัตน์ ที่กรุณาให้คำแนะนำถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ต่างๆให้กับผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ เตีย ผู้อำนวยการสถาบันฝึกอบรมและพัฒนาโรงงานต้นแบบ คุณทนงค์ ฉายาวัฒนะ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของสถาบันฝึกอบรมและพัฒนาโรงงานต้นแบบ รวมถึงเจ้าหน้าที่โรงงานกระดาษธนธาร เป็นอย่างยิ่งที่ช่วยสนับสนุนในการใช้เครื่องมือวิจัยและอำนวยความสะดวกในการวิจัยทุกอย่าง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เรือเอกวิทัศน์ ไชยยันบูรณ์ และเจ้าหน้าที่ของกรมการขนส่งทหารเรือที่ช่วยสนับสนุนผู้วิจัยในด้านการขนย้ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยอย่างดียิ่ง

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ญาติพี่น้องทุกๆท่าน เพื่อนทหาร รวมทั้งพี่และน้องๆ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานที่ให้กำลังใจผู้วิจัยในการทำวิจัยมาโดยตลอด

เรือเอกธนพงษ์ สุริเย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์ 2

1.3 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์ 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ 2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

3. ทฤษฎี 7

3.1 กากตะกอน (Sludge) 7

3.2 การเผาไหม้ (Combustion) 23

3.3 ฟลูอิดไดเซชั่น (Fluidization) 35

3.4 การเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด 50

4. วิธีการดำเนินการวิจัยและอุปกรณ์การทดลอง 57

4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์การทดลอง 57

4.2 อุปกรณ์การทดลองอื่นๆ 63

4.3 วิธีการดำเนินการวิจัย 76

4.4 การหาคุณสมบัติของทรายที่ใช้เป็นเบด 76

4.5 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ 77

4.6 การทดลองปรับเทียบค่าอัตราการป้อนกากตะกอนด้วยเครื่องป้อนกากตะกอนแบบสกรู และปรับเทียบค่าความเร็วกับอัตราการไหลของอากาศ 80

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.7 การหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่นและการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง 81

5. ผลการทดลอง 82

5.1 การหาคุณสมบัติของทรายที่ใช้เป็นเบด 82

5.2 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ 82

5.3 การทดลองปรับเทียบค่าอัตราการป้อนกากตะกอนด้วยเครื่องป้อนกากตะกอนแบบสกรูและปรับเทียบค่าความเร็วกับอัตราการไหลของอากาศ 83

5.4 การหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่น 83

5.5 การหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง 83

5.6 การหาค่าความเร็วของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่น 84

5.7 การทดลองการเผากากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ 84

6. วิจารณ์ผลการทดลอง 96

6.1 การทดลองเพื่อหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมของกากตะกอนสำหรับใช้ในการทดลอง 96

6.2 การศึกษาอัตราการป้อนกากตะกอน 97

6.3 การศึกษาปริมาณเถ้าที่เกิดจาการเผาไหม้ 97

6.4 การศึกษาอัตราการไหลของอากาศ 98

6.5 การศึกษาอุณหภูมิ 99

6.6 การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ 99

7. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ 104

7.1 ข้อสรุปของงานวิจัย 104

7.2 ข้อแนะนำที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 105

7.3 งานวิจัยที่ต่อเนื่อง 106

รายการอ้างอิง 108

ภาคผนวก .....

ภาคผนวก ก 110

ภาคผนวก ข 112

ภาคผนวก ค 115

ภาคผนวก ง 116

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ 117
ภาคผนวก ฉ 121
ภาคผนวก ช 126
ประวัติผู้เขียน 127

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 3.1.1 ชนิดและแหล่งที่มาของกากตะกอน 7

ตารางที่ 3.1.2 ลักษณะของกากตะกอนทางกายภาพ 8

ตารางที่ 3.1.3 ลักษณะของกากตะกอนทางเคมี 9

ตารางที่ 3.1.4 ค่าความเข้มข้นของกากตะกอน 9

ตารางที่ 3.1.5 กากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ 14

ตารางที่ 3.1.6 ชนิดและค่าความร้อนของกากตะกอน 20

ตารางที่ 3.2.1 ส่วนประกอบหลักของอากาศแห้ง 24

ตารางที่ 3.2.2 การเผาไหม้ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ 29

ตารางที่ 3.2.3 ปริมาณอากาศเกินพอที่ใช้กับระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง 33

ตารางที่ 5.1.1 การวิเคราะห์ทรายที่ใช้เป็นเบด 85

ตารางที่ 5.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนแบบประมาณ 86

ตารางที่ 5.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนแบบละเอียด 86

ตารางที่ 5.3.1 การปรับเทียบอัตราการป้อนกากตะกอน 87

ตารางที่ 5.3.2 การปรับเทียบอัตราการไหลของอากาศ 88

ตารางที่ 5.4.1 ผลการทดลองการหาค่าความเร็วของอากาศกับความดันลดผ่านเบด 91

ตารางที่ 5.7.1 ผลการทดลองการเผากากตะกอนที่อุณหภูมิ 850±10 °C 93

ตารางที่ 5.7.2 ผลการทดลองการเผากากตะกอนที่อุณหภูมิ 900±10 °C 94

ตารางที่ 5.7.3 ผลการทดลองการเผากากตะกอนที่อุณหภูมิ 950±10 °C 95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 3.1.1 กระบวนการกำจัด กากตะกอน และหน้าที่หลักของแต่ละระบบ 13

รูปที่ 3.1.2 เตาเผา กากตะกอน แบบ Multiple Hearth Incineration 21

รูปที่ 3.1.3 เตาเผา กากตะกอน แบบ Fluidized-Bed Incineration 21

รูปที่ 3.1.4 เตาเผาแบบ Wet Combustion Deep-Well Reactor 22

รูปที่ 3.2.1 ปริมาตรของก๊าซผสม (Gas Mixture) 25

รูปที่ 3.2.2 กระแสลมเร่งบังคับ 30

รูปที่ 3.2.3 กระแสลมเร่งเหนี่ยวนำ 31

รูปที่ 3.2.4 กระแสลมเร่งแบบสมดุล 31

รูปที่ 3.2.5 เส้นโค้งการสูญเสียความร้อนออกจากระบบเผาไหม้ 33

รูปที่ 3.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง% ของ CO_2 กับ% ของอากาศเกินพอของเชื้อเพลิงชนิดต่าง 34

รูปที่ 3.3.1 ระดับของเบดในหอทดลอง 36

รูปที่ 3.3.2 ผลการทดลองปริมาณการไหลกับความดันตก 37

รูปที่ 3.3.3 ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว 38

รูปที่ 3.3.4 ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ 38

รูปที่ 3.3.5 ตัวกระจายและชิ้นส่วนที่ทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ 39

รูปที่ 3.3.6 การเกิด Channeling 39

รูปที่ 3.3.7 ความสัมพันธ์ของเทอม $\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}}\phi_s^2$ กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42

รูปที่ 3.3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบดกับความเร็วของของไหลที่ผ่านเบด เมื่อเม็ดของแข็งมีขนาดใกล้เคียงกัน 45

รูปที่ 3.3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบดกับความเร็วของของไหลที่ผ่านเบด เมื่อเม็ดของแข็งมีการกระจายขนาดที่ดี 46

รูปที่ 3.3.10 ความสัมพันธ์ของ $C_dRe_p^2$ และ Re_p 47

รูปที่ 3.4.1 ส่วนประกอบของเตาเผา ฟลูอิดไดซ์เบด ขั้นพื้นฐาน 51

รูปที่ 4.1.1 เตาเผา ฟลูอิดไดซ์เบด 64

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.1.2 ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์ 65

รูปที่ 4.1.3 ระบบกระจายอากาศ 66

รูปที่ 4.1.4 ระบบการป้อนเชื้อเพลิง 67

รูปที่ 4.1.5 ระบบเป่าอากาศ 68

รูปที่ 4.1.6 ระบบดูดอากาศ 68

รูปที่ 4.1.7 ระบบจุดเตา 69

รูปที่ 4.1.8 ระบบระบายเถ้า 70

รูปที่ 4.1.9 จุดวัดอุณหภูมิ 71

รูปที่ 4.1.10 ระบบวัดอุณหภูมิ 72

รูปที่ 4.2.1 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ 73

รูปที่ 4.2.2 อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซเสีย 73

รูปที่ 4.2.3 อุปกรณ์บดกากตะกอน 74

รูปที่ 4.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลม 75

รูปที่ 5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกากตะกอนกับความเร็วรอบของเครื่องป้อนกากตะกอน 89

รูปที่ 5.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความเร็วของอากาศ 90

รูปที่ 5.4.1 กราฟความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่น 92

รูปที่ 6.1.1 กากตะกอนที่เกิดจากระบวนการผลิตกระดาษ 100

รูปที่ 6.1.2 กากตะกอนที่ผ่านการอบและทำการบดเรียบร้อยแล้ว 100

รูปที่ 6.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศกับอัตราการป้อนกากตะกอน 101

รูปที่ 6.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศกับคุณค่าทางความร้อนของเถ้า 102

รูปที่ 6.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ 103

รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเป็นทรงกลมเทียบเท่า 111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย