บทที่ 2

การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการรวบรวมความรู้ทั้งหมดเกี่ยวกับการอบแห้งกากอ้อย เริ่มด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากอ้อย ค่าความร้อนของกากอ้อย และการศึกษางานวิจัยต่างๆ

2.1 ส่วนประกอบของกากอ้อย

เกศสุชา พูลคำ [2] ได้ศึกษาส่วนประกอบของกากอ้อย โดยใช้ตัวอย่างที่ได้จากโรงงานน้ำตาลในประเทศไทย พบว่าค่าเฉลี่ยส่วนประกอบเป็นดังนี้

ความชื้น	46 – 52 %
ไฟเบอร์	43 – 52 %
Soluble solid	2 – 6 %

และขนาดของไฟเบอร์โดยเฉลี่ย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ไมครอน และยาว 1.2 - 1.7 มิลลิเมตร

Hugot [3] ได้รายงานส่วนประกอบของธาตุต่างๆของกากอ้อย

คาร์บอน	47 %
ไฮโดรเจน	6.5 %
ออกซิเจน	44 %
ธาตุอื่นๆ	2.5 %

สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [1] ในรายงานการศึกษาเรื่องการใช้และการประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาล ได้รายงานผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุต่างๆในกากอ้อยจากโรงงานน้ำตาลในภาคต่างๆของประเทศไทย ซึ่งวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

โรงงาน	สถานที่	สัดส่วนของธาตุ %					
		C	H	O	N	S	สิ่งเจือปน
ก	เขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ตอนบน)	43.1	6.4	49.2	0.17	0.03	1.1
ข	เขตภาคเหนือ (ตอนล่าง)	43.5	6.0	45.4	0.22	0.08	4.8
ค	เขตภาคตะวันออก	43.8	5.9	47.9	0.13	0.09	2.2
ง	เขตภาคกลาง (ตะวันออก)	46.0	5.8	45.8	0.42	0.08	1.9
จ	เขตภาคกลาง (ตะวันตกเฉียงเหนือ)	37.3	7.1	51.6	0.20	0.06	3.7
ฉ	เขตภาคเหนือ (ตอนล่าง)	46.1	6.1	43.7	0.38	0.04	3.7

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของธาตุในกากอ้อย

2.2 ค่าความร้อนของกากอ้อย

ค่าความร้อนของกากอ้อยเป็นปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยจากการเผาไหม้ต่อหน่วยน้ำหนักของกากอ้อย แบ่งออกเป็น 2 ค่า คือ

- ค่าความร้อนสูง (High Heating Value : HHV)
- ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value : LHV)

Behne [4] ได้รายงานค่า High Heating Value (HHV) ของกากอ้อยจากการนำกากอ้อยหลายๆแหล่งมาทดลองและได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19,520 kJ/kg (dry and ash-free)

Adams [5] ได้รายงานค่า HHV สำหรับกากอ้อยในรัฐหลุยเซียน่า ประเทศสหรัฐอเมริกา มีค่าเท่ากับ 19,300 kJ/kg (dry and ash-free)

Hessey [6] ได้พัฒนาสมการสำหรับคำนวณค่า HHV และ LHV สำหรับกากอ้อยของออสเตรเลีย

$$HHV = 19{,}410 - 51.4P - 194.10W \quad kJ/kg_{bagasse}$$

$$LHV = 18{,}104 - 51.4P - 205.32W \quad kJ/kg_{bagasse}$$

โดย

P — pol , % bagasse

W — moisture, % bagasse

กรณีที่ขี้เถ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 2.7 %

หากพิจารณาถึงผลของปริมาณขี้เถ้าด้วย เพื่อให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้นจะมีสมการเป็น

$$HHV = 199.5\ (100 - 0.17B - W - A + 0.07AW) \quad kJ/kg_{bagasse}$$

$$LHV = 186.1\ (100 - 0.18B - 1.13W - A + 0.07AW) \quad kJ/kg_{bagasse}$$

โดย

A — ash content, % dry bagasse

B — brix, % bagasse

W — moisture, % bagasse

Maranhao [7] ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของกากอ้อย เมื่อปริมาณความชื้นลดลง และได้ให้สมการที่ใช้คำนวณค่า HHV และ LHV ที่ค่าความชื้นต่างๆตามกฎของ Hugot ดังนี้

$$HHV = 4{,}600 - 12s - 46W \quad kJ/kg_{bagasse}$$

$$LHV = 4{,}250 - 12s - 48.5W \quad kJ/kg_{bagasse}$$

โดย

s — ปริมาณของแข็ง (ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาล , %)

W — moisture, % bagasse

สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [1] ในรายงานการศึกษาเรื่องการใช้และการประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาล ได้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (HHV) ของกากอ้อยในประเทศไทย โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 17,830 ถึง 19,482 kJ/kg กากอ้อยแห้ง ขึ้นอยู่กับชนิดของอ้อยและพื้นที่ปลูกอ้อย ค่าความร้อนของกากอ้อยได้จากธาตุ C, H สันดาปกับออกซิเจนที่มีในกากอ้อยและในอากาศให้ก๊าซ CO_2, H_2O และพลังงานความร้อน ค่าความร้อนของกากอ้อยได้จากกากอ้อยแห้งเท่านั้น เช่น กากอ้อยความชื้น 51% มาตรฐานเปียก มีมวลน้ำ 51% ที่เหลือ 49% เป็นกากอ้อยแห้ง ดังนั้นค่าความร้อนของกากอ้อยความชื้น 51% มาตรฐานเปียก เท่ากับ 9,428 kJ/kg น้ำในกากอ้อยชื้นนอกจากไม่ให้พลังงานแล้วยังต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและถูกพาออกไปในรูปก๊าซร้อนทิ้งทางปล่องของเตาหม้อไอน้ำ เช่นกากอ้อยมวล 1 kg ความชื้น 51% ใช้กับเตาหม้อไอน้ำอุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง 200 ^{o}C พลังงานความร้อนสูญเสียเพื่อระเหยน้ำ 0.51 kg ในกากอ้อยและค่าความร้อนสูญเสียทางก๊าซร้อนทิ้ง เท่ากับ 1,398 kJ ดังนั้นค่าความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์เหลือเท่ากับ 8,030 kJ/kg กากอ้อย

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pilgrim [8] ได้ทำการทดลองเพื่อหาสมการชั้นบางของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบดนิ่ง (fixed bed dryer) สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิลมร้อน 127 - 212 °C ความเร็วลม 0.15 - 0.57 m/s และความชื้นลมร้อน 0.016 - 0.14 kg/kg $_{dry\ air}$

Matsumoto และ David [9] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมสำหรับช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และนำแบบจำลองนี้ไปเขียนโปรแกรมจำลองแบบโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข Runge-Kutta-Gill ทำนายตัวแปรต่าง ๆประกอบด้วย ความชื้นของวัสดุ ความชื้นของก๊าซร้อน อุณหภูมิของก๊าซร้อน อุณหภูมิของวัสดุ และความเร็วของวัสดุ

ทำการจำลองแบบการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ เมล็ดต้นเรพ (rape seed) ข้าวสาลี และเมล็ดข้าวโพด ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆดังแสดงในตารางที่ 2.2

วัสดุ	ขนาด (mm)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
เมล็ดต้นเรพ	1.67	1080
ข้าวสาลี	4.0	1200
เมล็ดข้าวโพด	8.0	1280

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้จำลองแบบ

จากผลการจำลองแบบ พบว่า

1. ความชื้นของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วช่วงทางเข้าท่ออบแห้งและลดลงด้วยอัตราค่อนข้างคงที่เมื่อความยาวท่ออบแห้งมากขึ้น

2. ความชื้นของก๊าซร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วช่วงทางเข้าท่ออบแห้ง แสดงถึงอัตราการอบแห้งสูงเนื่องจากค่าความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัสดุและก๊าซมีค่าสูงและเพิ่มขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างคงที่เมื่อความยาวท่ออบแห้งมากขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนการป้อนวัสดุต่อการไหลของก๊าซ

3. อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของก๊าซร้อนที่เข้าท่ออบแห้งต่อจากนั้นอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ตลอดความยาวท่ออบแห้ง

4. อุณหภูมิของก๊าซร้อนมีแนวโน้มลดลงตลอดความยาวท่ออบแห้ง เนื่องจาก sensible heat ถูกใช้ในการอบแห้ง และลดลงเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนการป้อนวัสดุต่อการไหลของก๊าซ

5. ความเร็วของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วช่วงทางเข้าท่ออบแห้งและค่อนข้างคงที่เมื่อความยาวท่ออบแห้งมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการป้อนวัสดุต่อการไหลของก๊าซ ความเร็วจะลดลงเล็กน้อยเมื่อผ่านจุดสูงสุด

6. ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัสดุและก๊าซมีค่าลดลงตามความยาวท่ออบแห้ง แม้ว่า terminal settling velocity จะลดลงเนื่องจากการอบแห้ง แต่ความเร็วก๊าซที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิมีอัตราสูงกว่า

นอกจากนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อการอบแห้งและเกณฑ์การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ประกอบด้วย ขนาดวัสดุ อุณหภูมิของก๊าซร้อน อัตราส่วนการป้อนวัสดุต่อการไหลของก๊าซ และอัตราการไหลของก๊าซ สรุปได้ดังนี้

1. วัสดุขนาดเล็กมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวัสดุขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรท่ออบแห้งมากกว่า

2. อุณหภูมิของก๊าซร้อนถูกจำกัดโดยอุณหภูมิของวัสดุสูงสุดที่ยอมรับได้ โดยทั่วไปอุณหภูมิของวัสดุมีค่าค่อนข้างต่ำแม้จะใช้อุณหภูมิของก๊าซร้อนสูง

3. ค่าอัตราส่วนการป้อนวัสดุต่อการไหลของก๊าซสูงสุด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของก๊าซร้อน ความชื้นเริ่มต้นและสุดท้ายของวัสดุ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนเพิ่มขึ้น หากใช้ค่ามากกว่านี้ก๊าซร้อนจะอิ่มตัวก่อนลดความชื้นได้ตามต้องการ

4. อัตราการไหลของก๊าซต้องมีค่าสูงเพียงพอเพื่อให้สามารถขนส่งวัสดุได้ตลอดความยาวท่ออบแห้ง เนื่องจากการลดลงของความเร็วก๊าซร้อนเมื่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนลดลงซึ่งทำให้ความหนาแน่นของก๊าซร้อนเพิ่มขึ้น แม้ว่าความหนาแน่นของวัสดุชื้นจะลดลงเนื่องจากการอบแห้งก็ตาม

รัตนชัย ไพรินทร์ [10] ได้รายงานผลการวิจัยเรื่องการใช้ก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำอบแห้งกากอ้อยในโรงงานน้ำตาล โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่ง (fixed bed dryer) ทดลองที่สภาวะการทำงานจริง ตัวแปรหลักที่ศึกษาคือ ขนาดของกากอ้อย เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และอัตราการไหลก๊าซร้อน เมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนคงที่เท่ากับ 200 °C และความชื้นกากอ้อยเริ่มต้น 50-55 % สรุปว่า ความเร็วของการอบแห้งแปรตามอัตราการไหลก๊าซร้อน แต่แปรผกผันกับขนาดของกากอ้อย

ธีระยุทธ หลีวิจิตร [11] ได้ทำการจำลองแบบและทดลองเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง เพื่อหารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง การศึกษาได้ทำทั้งเครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่งและไหลสวนทาง ซึ่งมีขนาด 22.5 x 22.5 x 40 และ 22.5 x 22.5 x 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยใช้ตัวอย่างกากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล จ.สุพรรณบุรี มีสภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิลมร้อน 170 ถึง 200 องศาเซลเซียส ความชื้นลมร้อน 0.016 ถึง 0.019 กิโลกรัมไอน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ความเร็วลมร้อน 0.610 ถึง 0.804 เมตรต่อ วินาที และความชื้นตั้งต้นกากอ้อย 70 ถึง 125 % มาตรฐานแห้ง ที่อัตราการไหล 14 ถึง 18 กิโลกรัมกากอ้อยชื้นต่อชั่วโมง

สรุปสมการชั้นบางสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

$$\frac{M - M_e}{M_i - M_e} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-ckt)$$

โดย

$a = \frac{8}{\pi^2}$

c = ค่าคงที่จากการทดลอง = 10

$k = 0.0019 \exp(0.0073\ T) + 0.0292 \exp(-0.89\ A_b) + 0.00078\ V_a + 0.00057\ W^{-0.57} - 0.00088\ V_a \exp(-0.895) - 0.0314$

T - อุณหภูมิของลมร้อน, °C

A_b - ขนาดอนุภาคกากอ้อย, m

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

V_a - ความเร็วของลมร้อน, m/s

W - ความชื้นของลมร้อน, kg/kg $_{dry\ air}$

M - ความชื้นของกากอ้อย, kg/kg $_{dry\ bagasse}$

M_i - ความชื้นของกากอ้อยเริ่มต้น, kg/kg $_{dry\ bagasse}$

M_e - ความชื้นสมดุลของกากอ้อย, kg/kg $_{dry\ bagasse}$

จากการประเมินโรงงานตัวอย่างซึ่งมีอัตราการหีบอ้อย 100 ตันต่อชั่วโมง เมื่ออบแห้งกากอ้อยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจาก 50 % เป็น 35 % มาตรฐานเปียก พบว่าสามารถประหยัดการใช้กากอ้อยได้ 2 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 8 % ของปริมาณการใช้เดิม

ขนาดของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางที่จำลองแบบได้ของโรงงานน้ำตาลตัวอย่างมีพื้นที่หน้าตัดของห้องอบ 16.2 ตารางเมตร และสูง 4 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าต้องการขนาดพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งค่อนข้างมากซึ่งไม่เหมาะสมในการใช้งานจริง เนื่องจากต้องการอัตราการไหลของก๊าซไอเสียสูงเพื่อใช้ในการลดความชื้นแต่ความเร็วของก๊าซสำหรับเครื่องอบแห้งประเภทนี้ถูกจำกัดไม่ให้สูงเกินไป เพราะหากเพิ่มความเร็วมากกว่า 1 เมตรต่อวินาที กากอ้อยขนาดเล็กจะถูกพัดพาลอยไปกับก๊าซไอเสีย จึงจำเป็นต้องใช้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งมาทดแทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย