บทที่ 3

อุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศไทย

3.1 สถานภาพทั่วไป

อุตสาหกรรมน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมการเกษตรที่สำคัญของประเทศอุตสาหกรรมหนึ่งซึ่งนำรายได้เข้าประเทศจากการส่งออกเป็นลำดับที่ 5-6 รองจากข้าว ข้าวโพด ฯลฯ มีการส่งออกน้ำตาลในแต่ละปีประมาณร้อยละ 73 ของการผลิตทั้งหมด นำเงินรายได้เข้าประเทศในปี พ.ศ.2540 เป็นเงินถึง 31,494 ล้านบาท จากการส่งออกน้ำตาล 4,032,240 ตัน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ จะได้ศึกษาถึงโรงงานน้ำตาลตัวอย่างจำนวน 6 โรงงาน ซึ่งทำการคัดเลือกดังข้อมูลในภาคผนวก ก โดยชื่อที่ใช้เป็นชื่อสมมติเป็นโรงงาน ก ข ค ง จ และ ฉ ตามลำดับการเข้าไปสำรวจ

3.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำตาลทรายนั้น สำหรับอุตสาหกรรมน้ำตาลในประเทศไทย ใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบหลัก น้ำตาลทราย คือ น้ำตาลที่อยู่ในรูปของผลึก แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

3.1.1.1 น้ำตาลทรายดิบ (Raw Sugar)

มีลักษณะเป็นผลึกหรือเกล็ดสีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลเข้ม มีความชื้นสูง มีความบริสุทธิ์ต่ำ การผลิตใช้น้ำอ้อยผสมกับปูนขาว ทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส กรองแล้วส่งไปเข้าเข้าเครื่องต้มระเหยเพื่อแปรสภาพน้ำอ้อยให้ใสให้ข้น มีความเข้มข้นระหว่าง 60-65 องศาบริกซ์ จากนั้นก็ส่งไปยังหม้อเคี่ยวซึ่งใช้ความดันต่ำภายใต้สูญญากาศ จนเกิดผลึกมีความเข้มข้น 92-93 องศาบริกซ์ แล้วจึงส่งไปยังหม้อปั่นแยกได้ผลึกน้ำตาลทรายดิบออกมา ส่วนที่เหลือ คือ กากน้ำตาล (Molasses)

3.1.1.2 น้ำตาลทรายขาว (White Sugar)

มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว การผลิตน้ำตาลทรายขาวแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

3.1.1.2.1 วิธีใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผ่านลงไปในน้ำปูนขาวและน้ำอ้อย ทำปฏิกิริยากันแล้วจึงกรองเอาน้ำอ้อยใสไปเคี่ยวให้ตกผลึก แล้วปล่อยลงหม้อปั่นแยกผลึกน้ำตาลแล้วใช้น้ำฉีดเอากากน้ำตาลออกจากผลึก ใช้ไอน้ำเป่าไล่ความชื้นแล้วเข้าเครื่องทำให้เย็น

3.1.1.2.2 วิธีใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านลงไปในน้ำปูนขาวและน้ำอ้อย ทำปฏิกิริยากันเพื่อแยกสีและสิ่งไม่บริสุทธิ์ออกแล้วกรอง นำน้ำอ้อยใสไปเคี่ยวให้ตกผลึก น้ำตาลที่ได้จะขาวสะอาดกว่าวิธีใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

3.1.1.3 น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (Refined Sugar)

มีลักษณะเป็นผลึกใสสะอาดไร้สีที่เป็นอินทรีย์สาร มีความบริสุทธิ์เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ การผลิตทำได้โดยนำน้ำตาลทรายดิบมาผสมกับน้ำเชื่อมสำหรับล้างผลึกในถังผสมที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วนำไปสลัดแยกน้ำเชื่อมที่ล้างออกจากผลึกน้ำตาลทรายดิบด้วยหม้อปั่นน้ำตาลทราย (Affination Centrifuge) นำน้ำตาลที่แยกออกไปหลอมละลายในหม้อหลอม (Melter) ผสมกับสารช่วยกรอง และผงถ่านฟอกสีแล้วนำไปกรอง ผ่านน้ำเชื่อมที่กรองได้ (Fine Liquor) ไปต้มระเหยและเคี่ยวจนตกผลึกเป็นเกล็ดน้ำตาลทรายขาวแล้วอบให้แห้ง[1]

กระบวนการผลิตน้ำตาลในประเทศไทยมีลักษณะคล้าย ๆ กัน มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยระหว่างโรงงานขนาดใหญ่กับโรงงานขนาดเล็ก กระบวนการผลิตหลัก ๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ หน่วยเตรียมอ้อย หน่วยหีบอ้อย และหน่วยหม้อต้ม หม้อเคี่ยว หม้อปั่น

- **หน่วยเตรียมอ้อย** อ้อยจะขนส่งมายังโรงงานโดยรถบรรทุก จะต้องเตรียมเพื่อให้การทำงานขั้นต่อไปมีประสิทธิภาพ โดยจะต้องลำเลียงโดยสายพานเพื่อไปตัดโดยมีดตัดอ้อยเพื่อให้เป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย แล้วลำเลียงต่อไปยังหน่วยหีบอ้อย
- **หน่วยหีบอ้อย** เมื่ออ้อยที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยได้ลำเลียงมาถึงหน่วยหีบอ้อย ก็จะผ่านชุดลูกหีบ ถ้าผ่านลูกหีบหลายชุดก็จะได้น้ำตาลจากอ้อยมากขึ้น น้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุดแรกและชุดที่สองจะลำเลียงไปยังหน่วยหม้อต้ม ส่วนน้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุดถัด ๆ มา จะลำเลียงกลับไปพรมอ้อยที่กำลังหีบเพื่อเพิ่มความเข้มข้นก่อนนำส่งไปยังหน่วยหม้อต้ม ในระหว่างการหีบจะมีการเติมน้ำซึ่งใช้ในการพรมอ้อยเพื่อให้ได้น้ำอ้อยจากอ้อยที่กำลังหีบเพิ่มขึ้น ส่วนชานอ้อยที่เหลือจากการหีบจะลำเลียง

ต่อไปเป็นเชื้อเพลิงให้แก่หม้อไอน้ำของโรงงานต่อไป ชานอ้อยที่ได้จะมีความชื้นเปียกเฉลี่ยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

- **หน่วยหม้อต้ม หม้อเคี่ยว หม้อปั่น** เมื่อน้ำอ้อยลำเลียงมาจะอุ่นให้ร้อนประมาณ 65 องศาเซลเซียส และปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างให้เป็นกลาง (pH = 7) จากนั้นก้อจะส่งไปยังชุดของหม้อต้ม พอได้ความเข้มข้นที่ต้องการก้อจะส่งไปยังหม้อเคี่ยวสุญญากาศ เคี่ยวจนได้ผลึกน้ำตาล แล้วส่งต่อไปยังหม้อปั่นเพื่อแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาลและน้ำเชื่อม[1]

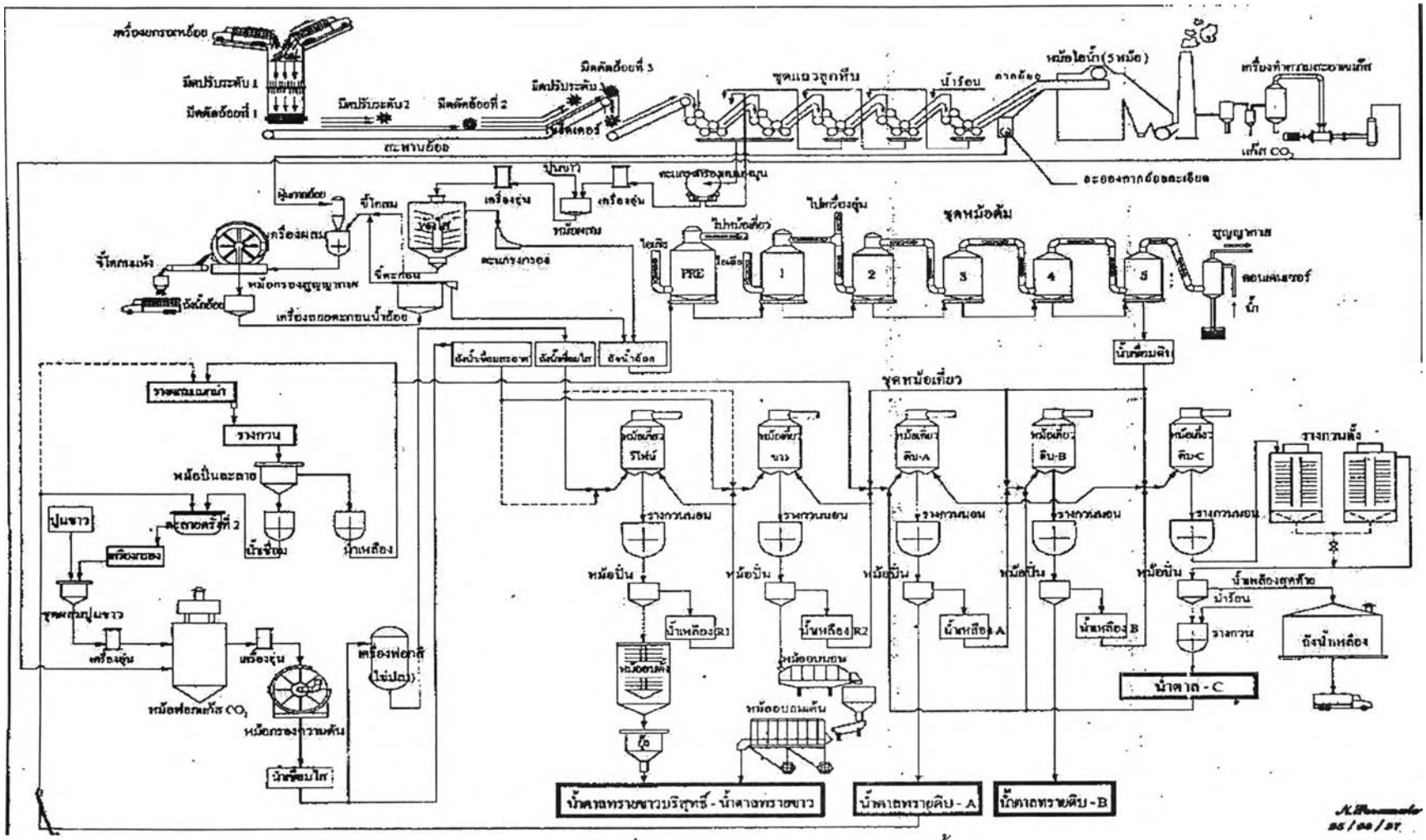
3.2 พลังงานในกระบวนการผลิตน้ำตาล

พลังงานใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลคือพลังงานความร้อนซึ่งใช้ของไหลทำงาน เป็นไอน้ำและน้ำร้อนผลิตจากหม้อไอน้ำ และพลังงานไฟฟ้าผลิตโดยใช้ไอน้ำขับกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แผนกผลิตไฟฟ้าของโรงงาน กระบวนการผลิตน้ำตาลแสดงอยู่ในรูป 3.2.1

จากรูปที่ 3.2.1 เริ่มจากอ้อยเข้าชุดมีดปรับระดับเพื่อให้อ้อยได้ขนาด ก่อนลำเลียงต่อไปยังชุดลูกหีบ ซึ่งมีประมาณ 5 ชุด (แล้วแต่โรงงาน) จากนั้นจะได้ชานอ้อยจะลำเลียงไปเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำส่วนหนึ่ง ส่วนที่เหลือลำเลียงไปกองเป็นเชื้อเพลิงสำรอง และน้ำอ้อยซึ่งลำเลียงไปเข้ากระบวนการผลิตจะผ่านชุดหม้อต้ม หม้อเคี่ยว หม้อปั่น ดังกระบวนการที่กล่าวข้างต้นจะได้เป็นน้ำตาลออกมา

กระบวนการใช้พลังงานความร้อน ได้แก่ หม้อไอน้ำใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงผลิตไอน้ำที่ความดันประมาณ 20 kg/cm^2 ถึง 30 kg/cm^2 และอุณหภูมิ 350^{o}C ถึง 370^{o}C. ตามลำดับ ไอน้ำทำงาน (Live steam) จ่ายให้อุปกรณ์ต้นกำลัง ได้แก่ กังหันไอน้ำเพื่อผลิตกำลังกลขับ มีดตัด ลูกหีบ ไอน้ำหลังการถูกใช้งานที่อุปกรณ์ต้นกำลังจะลดคุณภาพเป็นไอน้ำทิ้ง (Exhaust steam) เป็นไอน้ำอิ่มตัวความดันประมาณ 1.5 kg/cm^2 ถูกนำไปใช้ที่หม้อต้ม หม้อเคี่ยว หลังการใช้งานไอน้ำทิ้งกลั่นตัวเป็นน้ำถูกนำกลับไปที่หม้อไอน้ำ

รายละเอียดของหม้อไอน้ำของโรงงานทั้ง 6 โรงงาน แสดงอยู่ในภาคผนวก ก ตาราง ก 1 ถึง ก 6



รูปที่ 3.2.1 แสดงกระบวนการผลิตน้ำตาล

3.3 เชื้อเพลิง

โรงงานน้ำตาลใช้ชานอ้อย (bagasse) ที่ได้จากกระบวนการหีบอ้อยเป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำที่ความดันและอุณหภูมิตามข้อกำหนดของอุปกรณ์ ได้แก่ กังหันไอน้ำที่โรงงานใช้ เพื่อป้อนให้กับอุปกรณ์ของกระบวนการผลิต กังหันไอน้ำของมีดตัดอ้อย เซรดเดอร์ ลูกหีบ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้ในโรงงานและจำหน่ายให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำหรับบางโรงงานซึ่งมีกระแสไฟฟ้าเหลือใช้ สำหรับโรงงานน้ำตาลที่ศึกษามี 6 โรงงาน คัดเลือกจากความเหมาะสมของขนาดและความร่วมมือของโรงงาน กระจายอยู่ทุกภาคของประเทศไทย โรงงานเหล่านี้ใช้ไอน้ำความดัน 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ถึง 370 องศาเซลเซียส

สัดส่วนของชานอ้อยจากการหีบอ้อยประมาณ 28%-30% ของอ้อยนำเข้าหีบ เช่นกระบวนการหีบอ้อยของโรงงาน ก ให้ชานอ้อย 28% ดังนั้นเมื่อโรงงาน ก หีบอ้อย 18,000 ตันต่อวัน จะมีชานอ้อย 5,040 ตันต่อวัน ชานอ้อยจากกระบวนการหีบอ้อยมีความชื้นเปียกประมาณ 48% ถึง 53% ขึ้นอยู่กับแบบและความเร็วรอบและของลูกหีบ ชานอ้อยถูกลำเลียงโดยสายพานหรือรางจากลูกหีบป้อนเข้าหม้อไอน้ำโดยตรง ชานอ้อยส่วนเหลือใช้ถูกลำเลียงโดยสายพานหรือรางนำชานอ้อยเพื่อกองไว้ที่ที่เก็บภายในโรงงาน เพื่อรอนำกลับมาใช้เมื่อกระบวนการหีบอ้อยหยุดชั่วคราวและใช้หลังฤดูการหีบอ้อยเพื่อเป็นเชื้อเพลิงของกระบวนการผลิตน้ำตายทรายขาวจากน้ำตาลดิบ

<u>ความชื้นในชานอ้อย</u>

ความชื้นของชานอ้อยระบุเป็นความชื้นเปียก สมการของความชื้นคือ

$$\text{ความชื้นเปียกชานอ้อย\%} = (\text{มวลน้ำในชานอ้อย}/\text{มวลชานอ้อยรวม}) \times 100$$

$$= \frac{100 * \text{มวลน้ำในชานอ้อย}}{(\text{มวลน้ำในชานอ้อย} + \text{มวลชานอ้อยแห้ง})}$$

เช่น ชานอ้อยชื้น 52% มีมวลน้ำในชานอ้อยเท่ากับ 52% และมวลชานอ้อยแห้งเท่ากับ 48% พลังงานความร้อนได้จากการเผาไหม้ชานอ้อยมาจากชานอ้อยแห้งเท่านั้น พลังงานต่อมวลชานอ้อยต่ำเมื่อชานอ้อยมีความชื้นสูง โดยทั่วไปชานอ้อยจะมีความชื้นประมาณ 46-52% (เฉลี่ย 50%) เป็นเส้นใยประมาณ 43-52% (เฉลี่ย 47.7%) และเป็นของแข็งที่ละลายได้ประมาณ 2-6% (เฉลี่ย 2.3%)

<u>ส่วนประกอบของธาตุในชานอ้อยและค่าความร้อนจำเพาะ</u>

ชานอ้อยเป็นส่วนเส้นใยของลำต้นอ้อยหลังจากผ่านการบีบคั้นสกัดน้ำออกแล้ว ประกอบด้วย น้ำ เส้นใย และของแข็งที่ละลายได้จำนวนเล็กน้อย ปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์อ้อย อายุ วิธีเก็บเกี่ยว และประสิทธิภาพของโรงงาน ชานอ้อยประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน แทนด้วยสัญลักษณ์ตามลำดับดังนี้ C H O N และ S ตามลำดับ สัดส่วนของธาตุดังกล่าวขึ้นกับ ชนิดของอ้อยและพื้นที่ปลูกอ้อย ชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลที่เข้าทำการศึกษาได้จัดส่งให้กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์วิเคราะห์ ผลวิเคราะห์มีดังตาราง 3.3.1

ตาราง 3.3.1 สัดส่วนของธาตุในชานอ้อยและความร้อนจำเพาะ

โรงงาน	สถานที่	สัดส่วนของธาตุ %						ความร้อนจำเพาะ
	(จังหวัด)	C	H	O	N	S	สิ่งเจือปน	kJ/kg(ชานอ้อยแห้ง)
ก	ขอนแก่น	43.1	6.4	49.2	0.17	0.03	1.1	17,832
ข	กำแพงเพชร	43.5	6.0	45.4	0.22	0.08	4.8	16,526
ค	ชลบุรี	43.8	5.9	47.9	0.13	0.09	2.2	17,974
ง	ราชบุรี	46	5.8	45.8	0.42	0.08	1.9	17,150
จ	อุทัยธานี	37.3	7.1	51.6	0.20	0.06	3.7	17,939
ฉ	นครสวรรค์	46.1	6.1	43.7	0.38	0.04	3.7	17,002

ความร้อนจำเพาะของชานอ้อยได้จากธาตุ C, H สันดาปกับออกซิเจนที่มีในชานอ้อยและในอากาศให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานความร้อน ค่าความร้อนของชานอ้อยได้จากชานอ้อยแห้งเท่านั้น เช่น ชานอ้อยจากโรงงาน ก มีความชื้น 51% มีมวลน้ำ 51% ที่เหลือ 49% เป็นชานอ้อยแห้ง ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะของชานอ้อยชื้น 51% จากโรงงาน ก เท่ากับ 9,428 กิโลจูลต่อกิโลกรัม น้ำในชานอ้อยชื้นนอกจากไม่ให้พลังงานยังต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและถูกพาออกในรูปก๊าซร้อนทิ้งทางปล่องของเตาหม้อไอน้ำ เช่นชานอ้อยมวล 1 กิโลกรัม ความชื้น 51% ของโรงงาน ก ใช้กับหม้อไอน้ำอุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง 200 องศาเซลเซียส พลังงานความร้อนสูญเสียเพื่อระเหยน้ำ 0.51 กิโลกรัม ในชานอ้อยและความร้อนจำเพาะสูญเสียทางก๊าซร้อนทิ้งเท่ากับ 1,398 กิโลจูล ดังนั้นค่าความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์เหลือเท่ากับ 8,030 กิโลจูลต่อกิโลกรัม (ชานอ้อยมีความชื้นเปียกชื้น 51 %)

3.4 สถานภาพการใช้พลังงานจากชานอ้อยในปัจจุบันของโรงงานน้ำตาล

โรงงานน้ำตาลของประเทศใช้กระบวนการผลิตน้ำตาลที่คล้ายกัน ไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีคุณภาพระดับใกล้กันคือความดันของไอน้ำ 20 ถึง 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิ 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส ดังนั้นข้อมูลใช้ประเมินการใช้ชานอ้อยและชานอ้อยเหลือใช้คือ ชานอ้อย 1 กิโลกรัม ผลิตไอน้ำได้ 2 กิโลกรัม และไอน้ำ 1 กิโลกรัม.ใช้ในกระบวนการหีบอ้อย 2 กิโลกรัม เพื่อผลิตน้ำตาล ตัวอย่างโรงงานหีบอ้อย 10,000 ตันต่อวัน หรือ 417 ตันต่อชั่วโมง ใช้ไอน้ำ 208.5 ตันต่อชั่วโมง และใช้ชานอ้อยเท่ากับ 104 ตันต่อชั่วโมง สัดส่วนของชานอ้อยต่อมวลของอ้อยเท่ากับ 30% ชานอ้อยได้จากกระบวนการหีบอ้อยเท่ากับ 125 ตันต่อวัน. ดังนั้นโรงงานมีชานอ้อยเหลือเท่ากับ 21 ตันต่อชั่วโมง หรือเท่ากับ 504 ตันต่อวัน ถ้าโรงงานเปิดหีบอ้อย 100 วัน/ปี โรงงานมีชานอ้อยเหลือใช้เท่ากับ 50,400 ตันต่อปี ชานอ้อยเหลือใช้โรงงานใช้เพื่อกระบวนการละลายน้ำตาลดิบเพื่อผลิตน้ำตาลทรายขาว และใช้เพื่อเริ่มการผลิตปีในถัดไป

จากข้อมูลการหีบอ้อยในปี 2540/2541 โรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ 46 โรงงาน หีบอ้อย 42,200,978 ตัน[17] และข้อมูลเฉลี่ยที่ได้มาจากโรงงาน คือ อัตราการใช้ชานอ้อยเป็น 25% ของอ้อยเข้าหีบและชานอ้อยเหลือเป็น 3%ของอ้อยเข้าหีบ สามารถประเมินชานอ้อยทั้งระบบที่ใช้เท่ากับ 10,550,244.5 ตัน และปริมาณชานอ้อยเหลือจากการใช้เท่ากับ 1,266,029 ตัน โดยวิธีเดียวกันจะได้ตาราง 3.4.1 แสดงปริมาณชานอ้อยเหลือใช้ต่อปีของโรงงานทั้ง 6 โรงงาน

ตาราง 3.4.1 แสดงประมาณการใช้ชานอ้อยรายปีของโรงงานตัวอย่าง ปี 2540/2541

โรงงาน	กำลังหีบอ้อย (ตันต่อปี)[16]	ระยะเวลาหีบอ้อย (วัน)[16]	ปริมาณใช้ชานอ้อย (ตันต่อปี)	ปริมาณชานอ้อยเหลือใช้(ตันต่อปี)
ก	1,743,215	122	435,804	52,296
ข	1,100,778	100	275,195	33,023
ค	404,997	82	101,249	12,150
ง	661,619	96	165,405	19,849
จ	740,034	92	185,009	22,201
ฉ	2,669,639	99	667,410	80,089

การวิเคราะห์อัตราการใช้ชานอ้อยของหม้อไอน้ำโดยวิเคราะห์การเผาไหม้ชานอ้อย หมายถึง กระบวนการคำนวณอัตราการใช้ชานอ้อยโดยคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (โดยปริมาตร) เปอร์เซ็นต์ก๊าซออกซิเจน (โดยปริมาตร) และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ใน

หน่วย PPM และอุณหภูมิของก๊าซร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ และข้อมูลของส่วนประกอบของธาตุในขานอ้อย นอกจากนั้นประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ จำนวณได้จากการวิเคราะห์การเผาไหม้ขานอ้อย

ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

1. บันทึก เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (โดยปริมาตร) เปอร์เซ็นต์ก๊าซออกซิเจน (โดยปริมาตร) และอุณหภูมิของก๊าซร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ
2. สร้างสมการสันดาปของขานอ้อยกับอากาศโดยยึดส่วนประกอบของขานอ้อยจากตาราง 3.3.1
3. ใช้วิธี Trial & Error หาเปอร์เซ็นต์ (โดยปริมาตร) ของอากาศเพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (โดยปริมาตร) และเปอร์เซ็นต์ก๊าซออกซิเจน (โดยปริมาตร) เท่ากับค่าได้จากการวัดค่าของก๊าซร้อนทิ้ง
4. คำนวณความร้อนสูญเสียทางก๊าซร้อนทิ้ง และความร้อนสูญเสียทางผนังของหม้อไอน้ำ ปริมาณขานอ้อยไม่เผาไหม้ การสูญเสียพลังงานเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และพลังงานนำไปใช้ประโยชน์จากขานอ้อย
5. คำนวณอัตราการใช้ขานอ้อยจากข้อมูลอัตราผลิตไอน้ำและพลังงานนำไปใช้ประโยชน์จากการอ้อย

ข้อมูลที่ได้สำรวจจากโรงงานทั้ง 6 โรงงานแสดงให้เห็นดังตาราง 3.4.2ก ถึง 3.4.2ฉ โดยที่อักษรตัวท้ายเป็นสัญลักษณ์แทนโรงงาน เช่น ตาราง 3.4.2ก เป็นข้อมูลของโรงงาน ก เป็นต้น

ตาราง 3.4.2ก *แสดงข้อมูลจากการวัดของโรงงาน ก ซึ่งขานอ้อยมีความชื้น 51%*

หม้อไอน้ำ	$\%CO_2$	CO (PPM)	อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง (^oC)	พื้นที่ผิวหม้อไอน้ำ (m^2)	อุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ (^oC)
1	3.1	921	213	830	70
2	5.1	921	224	830	72
3	3.6	921	193	653	76
4	4.7	921	203	653	74
5	12.0	921	205	1,539	75

ตาราง 3.4.2ข แสดงข้อมูลจากการวัดของโรงงาน ข ซึ่งชานอ้อยมีความชื้น 52%

หม้อไอน้ำ	%CO_2	CO (PPM)	อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง (^oC)	พื้นที่ผิวหม้อไอน้ำ (m^2)	อุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ (^oC)
1	9.0	1,565	218	688.5	66.17
2	8.8	1,080	168	688.5	64.90
3	9.1	1,863	216	607.9	70.69
4	6.8	1,910	237	607.9	69.88
5	10.2	1,970	197	1,135.2	57.28

ตาราง 3.4.2ค แสดงข้อมูลจากการวัดของโรงงาน ค ซึ่งชานอ้อยมีความชื้น 51%

หม้อไอน้ำ	%CO_2	CO (PPM)	อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง (^oC)	พื้นที่ผิวหม้อไอน้ำ (m^2)	อุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ (^oC)
1	8.5	3,549	316	245.76	57.52
2	9.0	3,549	314	261.70	68.79
3	9.3	3,549	244	288.00	67.03
4	8.2	3,549	212	966.52	64.70

ตาราง 3.4.2ง แสดงข้อมูลจากการวัดของโรงงาน ง ซึ่งชานอ้อยมีความชื้น 49%

หม้อไอน้ำ	%CO_2	CO (PPM)	อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง (^oC)	พื้นที่ผิวหม้อไอน้ำ (m^2)	อุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ (^oC)
2	6.1	700	250	631.75	68
3	6.0	1,703	221	651.50	71
4	4.7	663	189	589.00	66

ตาราง 3.4.2จ แสดงข้อมูลจากการวัดของโรงงาน จ ซึ่งชานอ้อยมีความชื้น 49%

หม้อไอน้ำ	$\%CO_2$	CO (PPM)	อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง (^oC)	พื้นที่ผิวหม้อไอน้ำ (m^2)	อุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ (^oC)
1	3.0	1,730	165	985.58	59
2	5.1	1,411	147	987.55	58
4	4.7	1,704	152	810.50	68
5	9.9	2,581	151	979.29	65

ตาราง 3.4.2ฉ แสดงข้อมูลจากการวัดของโรงงาน ฉ ซึ่งชานอ้อยมีความชื้น 53%

หม้อไอน้ำ	$\%CO_2$	CO (PPM)	อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง (^oC)	พื้นที่ผิวหม้อไอน้ำ (m^2)	อุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ (^oC)
1	5.3	1,428	173	1764.80	73.68
5	4.6	1,428	178	1,364.44	64.29
6	4.6	1,428	173	1,398.00	63.14
7	3.8	1,428	163	1856.60	75.57

ตัวอย่างของการคำนวณอัตราการใช้ชานอ้อยและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำตัวอย่าง โดยที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากโรงงาน ก ความชื้นชานอ้อย 51 % ในการคำนวณจะใช้ข้อมูลอุณหภูมิบรรยากาศ 35^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % ปริมาณชานอ้อยเผาไหม้ไม่หมด 2.5% ของชานอ้อยที่ใช้ และการปล่อยไอน้ำทิ้ง (Blow down) 6% ตลอดการคำนวณ

1. % CO_2 (โดยปริมาตร) ซึ่งบันทึกจากมิเตอร์ห้องควบคุมหม้อไอน้ำเท่ากับ 12% อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้งเท่ากับ 205^{o}C และ CO ของก๊าซร้อนทิ้งเท่ากับ 921 PPM

2. สมการสันดาป ในการสันดาปจะมีส่วนประกอบในฝั่งขาเข้าอยู่ 2 ส่วน ได้แก่

   2.1 ส่วนประกอบของชานอ้อย จากผลของการวิเคราะห์ชานอ้อยโดยมวลในตารางที่ 3.3.1 ชานอ้อยของโรงงาน ก ประกอบด้วยคาร์บอน 43.1% ไฮโดรเจน 6.4% ไนโตรเจน 0.17% ออกซิเจน 49.2% และน้ำซึ่งชานอ้อยชื้น 51% จะเขียนการวิเคราะห์ได้โดยการหาจำนวนโมลของส่วนประกอบแต่ละตัว โดยการนำเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหารด้วยมวลโมเลกุล จะได้

$$\left[\frac{43.1C}{12}+\frac{6.4H_2}{2}+\frac{49.2O_2}{32}+\frac{0.17N_2}{28}+\frac{104.08H_2O}{18}\right]$$

หรือเท่ากับ $3.59C + 3.2H_2 + 1.54O_2 + 0.006N_2 + 5.78H_2O$

2.2 ส่วนประกอบของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ซึ่งอากาศที่ใช้นั้นเป็นอุณหภูมิบรรยากาศ กำหนดให้เท่ากันทุกโรงงานคือ มีอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50% โดยทั่วไปอากาศจะมีออกซิเจนซึ่งใช้ในการเผาไหม้โดยตรง ถ้าการเผาไหม้สมบูรณ์จำนวนโมลออกซิเจนรวมของอากาศและชานอ้อยจะรวมตัวกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในชานอ้อยพอดี เนื่องจากเราไม่รู้ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้ กำหนดให้ปริมาณอากาศทางทฤษฎีเป็น E จะได้จำนวนโมลของออกซิเจนในอากาศที่ใช้คือ (E/100) * (จำนวนโมลของคาร์บอน+(จำนวนโมลของไฮโดรเจน/2) – จำนวนโมลออกซิเจนในชานอ้อย) ซึ่งเท่ากับ (E/100) * (3.59 + (3.2/2) – 1.54) เท่ากับ 3.65 * E/100 ส่วนจำนวนโมลของไนโตรเจนนั้นเป็น 3.76 เท่าของออกซิเจน ปริมาณน้ำในอากาศเป็นสัดส่วนต่อความชื้นสัมพัทธ์ จะได้

$$\left[\frac{E}{100}(3.65O_2+13.724N_2+0.497H_2O)\right]$$

สมการสันดาปของ 100 กิโลกรัมชานอ้อยแห้ง หรือเท่ากับ ชานอ้อยเปียก 204 kg. (ความชื้นชานอ้อย 51%) คือ

$$[3.59C+3.2H_2+1.54O_2+0.006N_2+5.78H_2O]+\left[\frac{E}{100}(3.65O_2+13.724N_2+0.497H_2O)\right]$$

$$\longrightarrow (3.59-Y)CO_2+YCO+3.2H_2O+\frac{(E-100)}{100}x3.65O_2+\frac{Y}{2}O_2 \quad \text{(ส่วนที่ทำปฏิกิริยา)}$$

$$+0.13724EN_2+0.006N_2+0.00497EH_2O+5.78H_2O \quad \text{(ส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา)}$$

โดยที่ E คือ ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้ในการสันดาป (%)

Y คือ จำนวนโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์

อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้งอุณหภูมิ 205°C น้ำอยู่ที่สภาวะไอ เมื่อก๊าซร้อนทิ้งถูกดูดเข้ามิเตอร์ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิประมาณอุณหภูมิบรรยากาศ ทำให้ไอน้ำในก๊าซร้อนทิ้งกลั่นตัวบางส่วน คำนวณได้โดยสมการ

$$NM_{WC} = \frac{NM_W - \left(\frac{P_v, t_a}{P_{atm}}\right) NM_{ExH}}{1 - \left(\frac{P_v, ta}{P_a}\right)}$$

โดยที่ NM_{WC} = จำนวนโมลน้ำกลั่นตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ

NM_W = จำนวนโมลของไอน้ำในก๊าซร้อนทิ้ง

NM_{ExH} = จำนวนโมลรวมของก๊าซร้อนทิ้ง

Pv,ta = ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศ

Pa = ความดันบรรยากาศ

จำนวนโมลของไอน้ำที่เหลืออยู่ในก๊าซร้อนทิ้ง = (8.98 + 0.00497E/100) - NM_{WC}

3. จากสมการสันดาป $\%CO_2$ (โดยปริมาตร) ในก๊าซร้อนทิ้งคำนวณได้ที่อัตราการใช้อากาศทางทฤษฎี (E) ใด ๆ สำหรับข้อมูล % CO_2 (โดยปริมาตร) ของขณะที่วัดเท่ากับ 12 % จะได้การใช้ อากาศทางทฤษฎีเท่ากับ 161 %

4. ความร้อนที่สูญเสียประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของก๊าซร้อนทิ้ง ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อไอน้ำ ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการปล่อยไอน้ำทิ้ง (Blow Down) ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่หมดของขานอ้อย สามารถคำนวณได้ดังนี้

เมื่อความร้อนสูญเสียทางก๊าซร้อนทิ้ง = (ความร้อนแฝงสูญเสียเพื่อใช้ระเหยน้ำในขานอ้อย) + (ความร้อนจำเพาะก๊าซร้อน) + ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

เมื่อความร้อนแฝงสูญเสียเพื่อใช้ระเหยน้ำในขานอ้อย = มวลน้ำในขานอ้อย * $h_{f(\text{ที่อุณหภูมิบรรยากาศ})}$

= 104 kg x 2,418.6 kJ/kg

= 251.7 MJ/(100 kg.ขานอ้อยแห้ง)

ความร้อนจำเพาะก๊าซร้อน = มวลก๊าซร้อน * c_p * (อุณหภูมิก๊าซร้อน - อุณหภูมิบรรยากาศ)

= 1,024.438 kg * 1.145499 kJ/kg.K * (478 – 308) K

= 199.5 MJ/(100 kg ขานอ้อยแห้ง)

ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ = จำนวนโมลก๊าซร้อน * (ผลต่างเอนทาลปีของการสันดาปของ CO_2 และ CO)

= 0.034749 mol * (393522-110529)kJ/kmol

= 9.8 MJ/(100 kg ชานอ้อยแห้ง)

ความร้อนสูญเสียของก๊าซร้อนทิ้ง = 251.7 + 199.5 + 9.8 = 461 MJ/100 kg ชานอ้อยแห้ง.

ความร้อนสูญเสียที่ผนังเตาหม้อไอน้ำ = (สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผนังเตา)*(ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังเตากับบรรยากาศ)*(พื้นที่ผนังเตา)

= 11.03($W/m^2.^oC$)×(75-35)^oC×1539m^2

= 2444.424 MJ/hr

ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการปล่อยไอน้ำทิ้ง = (h_fที่ความดันไอน้ำ-h_fน้ำป้อน) * %Blowdown * ปริมาณน้ำป้อน

= (1,008.42-146.68) * 0.06 * 250

= 12,926.10 MJ/hr

5. พลังงานความร้อนนำไปใช้ประโยชน์ได้จากชานอ้อย คำนวณได้จากปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ ซึ่งอัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ยของหม้อไอน้ำ 5 ของโรงงาน ก เป็น 220.82 ตันต่อชั่วโมง จะได้

พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ = อัตราการไหลไอน้ำ×(h_O-h_{fi})

= 220.82 * (3,171.5 – 434.6)

= 604,373.00 MJ/hr

โดยที่ h_O และ h_{fi} = เอนทัลปีของไอน้ำจ่ายจากหม้อไอน้ำและน้ำป้อนตามลำดับ

ความร้อนจำเพาะชานอ้อยที่นำไปใช้ประโยชน์ในการเผาไหม้ คำนวณได้จากค่าความร้อนจำเพาะหักออกด้วยความร้อนสูญเสียของก๊าซร้อนทิ้ง จะได้

ความร้อนจำเพาะชานอ้อยที่นำไปใช้ประโยชน์ = (17.832 * 100) – 461 MJ/100kgชานอ้อยแห้ง

= 1,322.2 MJ/100kgชานอ้อยแห้ง

= 1,322.2 / (100 * 204) MJ/kg ชานอ้อยเปียก

= 6.48 MJ/kg ชานอ้อยเปียก

อัตราการใช้ชานอ้อย = [พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ + ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา + ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการ blow down] * อัตราชานอ้อยไม่เผาไหม้ / ความร้อนจำเพาะชานอ้อยที่นำไปใช้ประโยชน์

จะได้ อัตราการใช้ชานอ้อย = $\frac{[220.82*(3,164-434.6)+2444.424+12,926.10]*1.025}{(6.48*1000)}$

= 97.82 t/hr (ชานอ้อยเปียก ความชื้น 51%)

จากการคำนวณดังกล่าวข้างต้น จะได้ผลของการวัดดังตารางที่ 3.4.3ก ถึง 3.4.3ฉ

ตาราง 3.4.3ก แสดงผลการคำนวณการใช้พลังงานของโรงงาน ก

หม้อไอน้ำ	1	2	3	4	5
1. ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้จริง (%)	620	350	520	380	161
2. ความร้อนสูญเสีย					
2.1 ในก๊าซร้อนทิ้ง (kJ/kg ชานอ้อย)	4,512.22	3,330.72	3,731.65	3244.38	2259.20
2.2 ที่ผนังหม้อไอน้ำ (MJ/hr)	2,444.424	2,444.424	2,444.424	2,444.424	2,444.424
2.3 ปล่อยไอน้ำทิ้ง (MJ/hr)	1,221.257	1,486.115	1,160.541	1,293.606	12,926.10
3. อัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ย (T/hr)	41.80	46.76	36.11	44.15	220.82
4. พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (MJ/hr)	113,204.54	125,670.13	95,977.06	118,506.20	604,373.00
5. อัตราการใช้ชานอ้อย (T/hr)	28.35	24.57	20.39	22.81	97.82

ตาราง 3.4.3ข แสดงผลการคำนวณการใช้พลังงานของโรงงาน ข

หม้อไอน้ำ	1	2	3	4	5
1. ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้จริง (%)	210	213	214	307	184
2. ความร้อนสูญเสีย					
2.1 ในก๊าซร้อนทิ้ง (kJ/kg ชานอ้อย)	2,628.93	2,261.74	2,654.34	3,329.31	2,388.58
2.2 ที่ผนังหม้อไอน้ำ (MJ/hr)	852.155	817.435	861.503	841.951	1,004.287
2.3 ปล่อยไอน้ำทิ้ง (MJ/hr)	3,294.133	3,008.937	2,417.546	2,539.249	3,957.282
3. อัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ย (T/hr)	68.68	62.47	48.05	47.65	78.59
4. พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (MJ/hr)	171,469.05	168,794.50	129,408.60	128,484.85	215,702.65
5. อัตราการใช้ชานอ้อย (T/hr)	33.94	31.20	25.77	29.36	40.80

ตาราง 3.4.3ค แสดงผลการคำนวณการใช้พลังงานของโรงงาน ค

หม้อไอน้ำ	1	2	3	4
1. ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้จริง (%)	210	213	172	201
2. ความร้อนสูญเสีย				
2.1 ในก๊าซร้อนทิ้ง (kJ/kg ชานอ้อย)	3,273.66	3,140.70	2,674.79	2,640.12
2.2 ที่ผนังหม้อไอน้ำ (MJ/hr)	219.765	351.132	366.292	1,139.844
2.3 ปล่อยไอน้ำทิ้ง (MJ/hr)	356.016	875.090	1,345.800	4,164.877
3. อัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ย (T/hr)	12.32	20.33	34.10	85.99
4. พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (MJ/hr)	29,423.80	54,892.34	91,595.09	234,321.00
5. อัตราการใช้ชานอ้อย (T/hr)	5.56	10.15	15.60	39.83

ตาราง 3.4.3ง แสดงผลการคำนวณการใช้พลังงานของโรงงาน ง

หม้อไอน้ำ	2	3	4
1. ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้จริง (%)	284	290	380
2. ความร้อนสูญเสีย			
2.1 ในก๊าซร้อนทิ้ง (kJ/kg ชานอ้อย)	3,244.98	2,998.27	3,077.98
2.2 ที่ผนังหม้อไอน้ำ (MJ/hr)	827.823	931.311	725.028
2.3 ปล่อยไอน้ำทิ้ง (MJ/hr)	5,428.962	3,877.83	3,877.83
3. อัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ย (T/hr)	97.5	70.5	76.5
4. พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (MJ/hr)	266,166.50	192,422.70	208,799.10
5. อัตราการใช้ชานอ้อย (T/hr)	50.75	35.17	38.59

ตาราง 3.4.3จ แสดงผลการคำนวณการใช้พลังงานของโรงงาน จ

หม้อไอน้ำ	1	2	4	5
1. ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้จริง (%)	490	417	372	350
2. ความร้อนสูญเสีย				
2.1 ในก๊าซร้อนทิ้ง (kJ/kg ชานอ้อย)	2,909.52	2,591.32	2,470.74	2,386.23
2.2 ที่ผนังหม้อไอน้ำ (MJ/hr)	939.25	901.91	1,062.05	1,166.57
2.3 ปล่อยไอน้ำทิ้ง (MJ/hr)	4,755.57	4,566.72	3,268.08	4,018.00
3. อัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ย (T/hr)	78	80	60	119.2
4. พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (MJ/hr)	212,893.20	218,352.00	163,764.00	325,344.48
5. อัตราการใช้ชานอ้อย (T/hr)	35.49	34.58	25.50	49.51

ตาราง 3.4.3ฉ *แสดงผลการคำนวณการใช้พลังงานของโรงงาน ฉ*

หม้อไอน้ำ	1	5	6	7
1. ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้จริง (%)	321	363	363	458
2. ความร้อนสูญเสีย				
2.1 ในก๊าซร้อนทิ้ง (kJ/kg ชานอ้อย)	2,743.77	3,064.35	3,007.35	3,296.97
2.2 ที่ผนังหม้อไอน้ำ (MJ/hr)	2,710.566	1,586.908	1,562.102	2,990.896
2.3 ปล่อยไอน้ำทิ้ง (MJ/hr)	7,094.939	6,951.825	5,783.043	10,481.45
3. อัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ย (T/hr)	151.21	135.14	134.40	205.67
4. พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (MJ/hr)	412,772.33	383,219.13	359,445.17	573,610.13
5. อัตราการใช้ชานอ้อย (T/hr)	79.96	78.79	72.95	123.72

จากผลการคำนวณในตารางที่ 3.4.3 พบว่าหม้อไอน้ำส่วนมากมีการใช้ปริมาณอากาศทางทฤษฎีสูงเกินไป ซึ่งหากมีการใช้ปริมาณอากาศทางทฤษฎีมากก็เท่ากับเป็นการใช้พลังงานเพื่อทำให้อากาศเหล่านี้ร้อนในห้องเผาไหม้โดยเปล่าประโยชน์ การปรับปรุงปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ใช้ในการเผาไหม้จะกล่าวในบทถัดไป