

งานวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีร่วมกับเอนทัลปีในอุตสาหกรรม

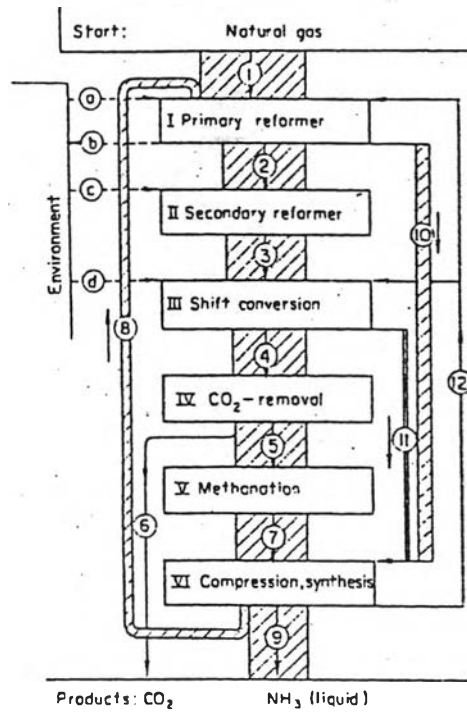
โดยทั่วไป การวิเคราะห์พลังงานส่วนใหญ่มักพิจารณาเฉพาะปริมาณของพลังงาน (Quantity of energy) ซึ่งแสดงออกด้วยเอนทัลปี (Enthalpy) อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องทราบถึงคุณภาพของพลังงาน (Quality of energy) ซึ่งจะเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงการใช้พลังงานว่าก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณค่าของพลังงานมากน้อยเพียงไร ตัวแสดงที่บ่งบอกคุณภาพของพลังงานได้แก่ เอ็กเซอร์จี (Exergy) จากนิยามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับเอ็กเซอร์จีในกรณีของพลังงานความร้อนคือ อุณหภูมิ (Temperature) เพราะเป็นตัวกำหนดคุณภาพสูงหรือต่ำของพลังงานความร้อน

ที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้เอ็กเซอร์จีร่วมกับเอนทัลปี ในการวิเคราะห์ระบบพลังงานทั้งในรูปแบบพลังงานความร้อน, พลังงานไฟฟ้าและอื่น ๆ อนึ่ง ในสุดท้ายจะกล่าวถึงบทความที่สามารถจะค้นคว้าเพิ่มเติมได้ในเรื่องนี้

3.1 ตัวอย่างที่ 1 (4)

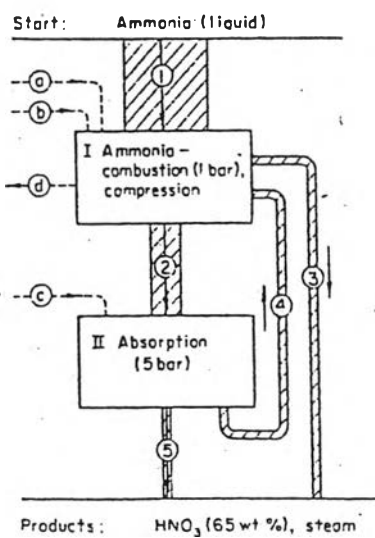
Lothar Riekert ได้ศึกษาการหาประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในกระบวนการเคมี โดยการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีและได้เลือกศึกษากระบวนการ 2 ตัวอย่าง ต่อไปนี้

กระบวนการที่ 1: การผลิตแอมโมเนียจากก๊าซธรรมชาติ (Ammonia from natural gas) (ดูรูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 Flow sheet ของกระบวนการผลิตแอมโมเนียจากก๊าซธรรมชาติ

กระบวนการที่ 2: การผลิตกรดไนตริกจากแอมโมเนีย (Nitric acid from ammonia) (ดูรูปที่ 3.2)



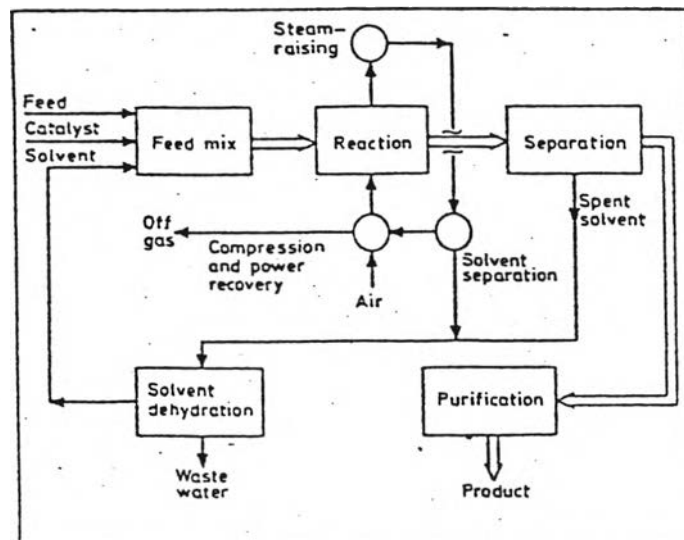
รูปที่ 3.2 Flow sheet ของกระบวนการผลิตกรดไนตริกจากแอมโมเนีย

3.2 ตัวอย่างที่ 2 (15)

D. W. Townsend ได้นำแนวคิดของ Linnhoff (14) ไปประยุกต์กับ
2 กรณีศึกษาต่อไปนี้

กรณีศึกษาที่ 1 : การออกแบบกระบวนการ (Process Design)

ตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมเคมีที่ศึกษา เป็นกรณีที่มีการ
ออกซิเดชันด้วยอากาศในสถานะของเหลว ดังแสดงไว้ในรูป 3.3



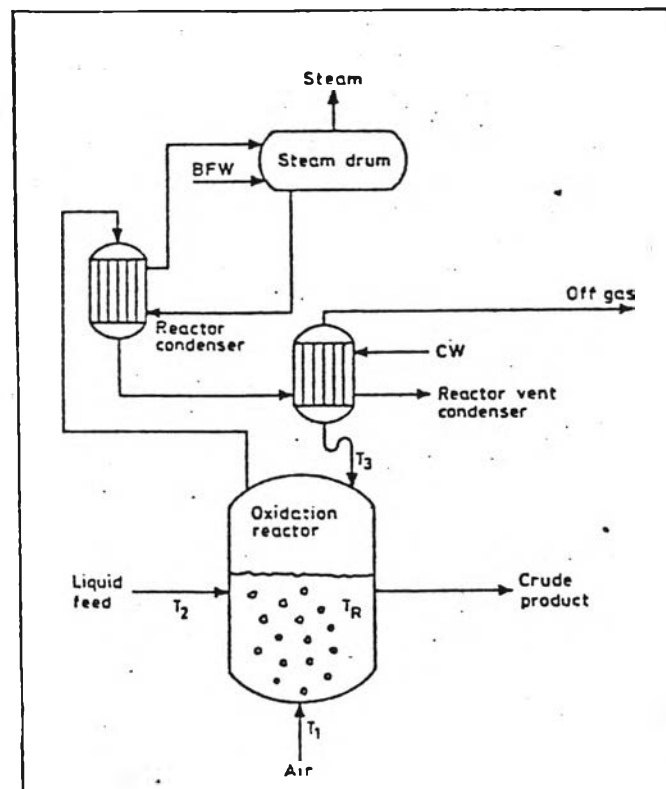
รูปที่ 3.3 Process Block Diagram

ผลการวิเคราะห์การสูญเสียของเอ็กเซอร์จิมสรุปไว้ในตาราง 3.3

ตาราง 3.3 Exergy Losses by Plant Areas

Plant Area	Ex (Irrev) (MW)
Feed Preparation	0.04
Reactor Systems	57.64
Reactors Air System	5.24
Product Separation	1.76
Solvent Dehydration	13.05
Product Purification	2.89

จากตาราง 3.3 จะเห็นว่าระบบทำปฏิกิริยา (Reactor system) เป็นหน่วยที่น่าศึกษาเพราะสูญเสียเอ็กเซอร์ยีเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 3.4 Process Reactor System: Flow Diagram

จากการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีอย่างละเอียดพบว่า การสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และที่หลีกเลี่ยงได้เป็นดังแสดงไว้ในตาราง 3.4 และตาราง 3.5

ตาราง 3.4 Reactor System Exergy Losses

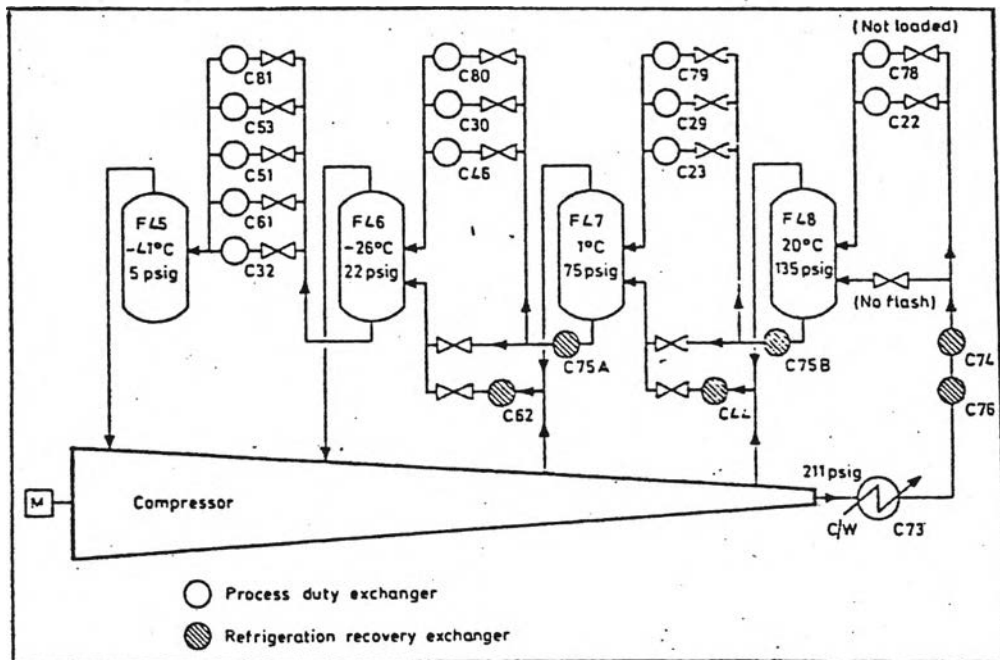
Source of Loss	Ex (Irrev) (MW)
Reactors Steam Drum	0.08
Reactor Condensers	3.95
Reactor Vent Condensers	4.95
Oxidation Reactors	48.66
Total	57.64

ตาราง 3.5 Reactor System Exergy Losses with Inevitable Reactor Loss Discounted

Source of Loss	Ex (Irrev) (MW)
Reactors Steam Drum	0.08
Reactor condensers	3.95
Reactor Vent Condensers	4.95
Oxidation Reactors	9.12
Total	18.10

กรณีศึกษาที่ 2: การตรวจสอบและพัฒนาระบบการ (Process Investigation and Development)

กรณีศึกษานี้ ได้แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์ โดยกฎข้อที่สองว่าเป็นเครื่องมือที่ง่ายและสะดวกในการตรวจสอบและพัฒนาระบบการ ระบบที่ได้เลือกศึกษาคือระบบทำความเย็น (Refrigeration system) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Refrigeration System

ผลการวิเคราะห์ระบบดังกล่าวมีแสดงไว้ในตาราง 3.6

ตาราง 3.6 Refrigeration System Exchangers--Loads and Second Law Efficiencies

Exchanger	Load (MW)	Efficiency (%)	Ex (Irrev) (MW)
C81	0.6	71	0.04
C53	0.2	51	0.03
C51	0.3	73	0.02
C61	20.1	84	0.85
C32	4.8	59	0.53
C80	9.3	73	0.46
C30	0.6	42	0.06
C46	4.7	73	0.24
C79	0.9	46	0.03
C29	3.3	56	0.10
C23	0.4	0	0.03
C78	0.0	-	-
C22	7.6	Negative	0.56
C62	12.6	61	0.54
C44	7.0	0	0.33
C75	2.8	72	0.08
C74	0.4		
C76	1.4	4	0.25

กรณีศึกษาหลังนี้ ยังสามารถนำไปสู่การออกแบบโครงข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger network) ได้ ผู้ที่ได้ทำการศึกษาต่อคือ B. Linnhoff (16, 17)

3.3 ตัวอย่างที่ 3 (14)

B. Linnhoff และ K. J. Carpenter ได้เสนอการวิเคราะห์
 ผลงานในแง่เอนโทรปี โดยวิธีที่ง่ายและสะดวก โดยแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์
 กระบวนการผลิตกรดไนตริก ซึ่งมีไดอะแกรมอย่างง่ายดังแสดงในรูป 3.8

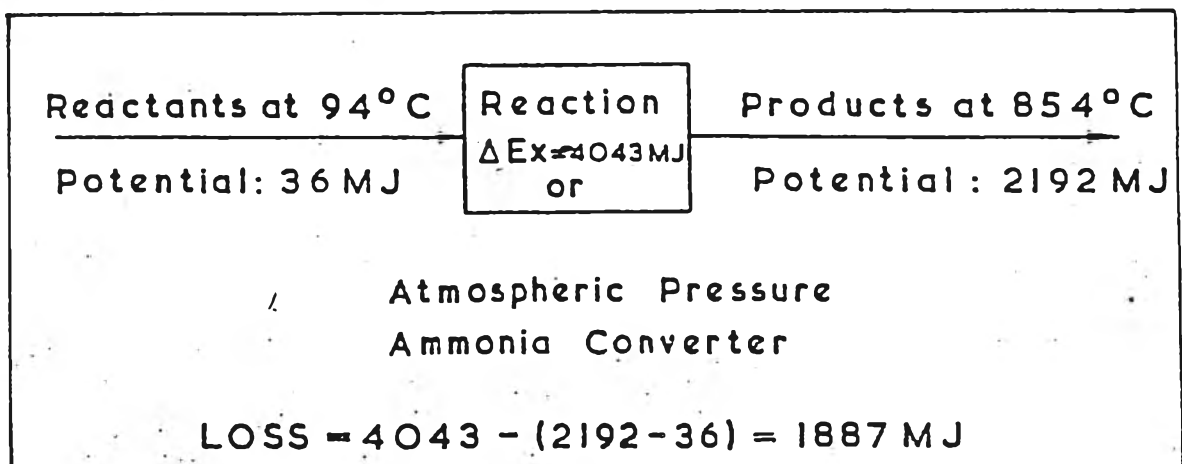
ผลการวิเคราะห์มีแสดงไว้ในตาราง 3.7

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการสูญเสียที่หลีกเลี่ยงได้ (Avoidable loss) เป็น $\epsilon T_0 - \epsilon T_0$ (best practical)

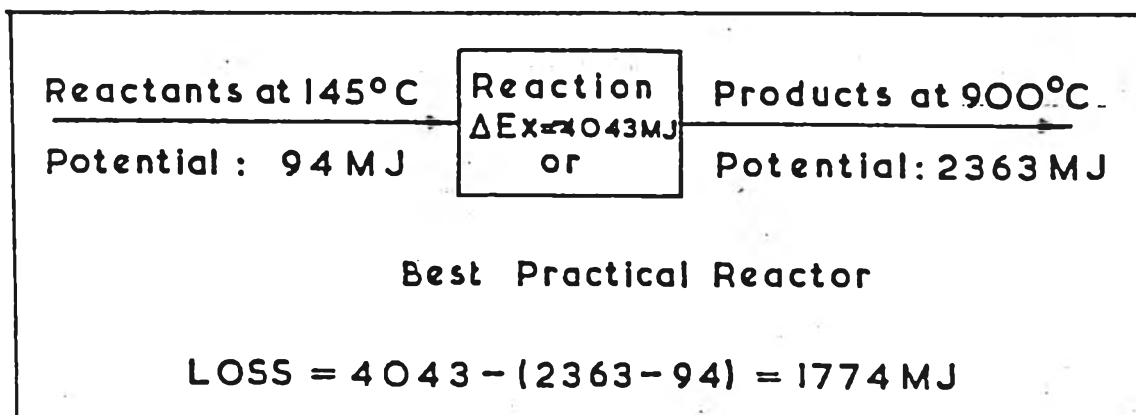
โดย ϵ : เป็นค่าเพิ่มของเอนโทรปี (entropy)

T_0 : อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

ตาราง 3.7 ยังได้เสนอการสูญเสียที่หลีกเลี่ยงได้ใน Converter ดัง
 รายละเอียดที่แสดงไว้ในรูป 3.6 และรูป 3.7



รูปที่ 3.6 Atmospheric Pressure Ammonia Converter



รูปที่ 3.7 Best Practical Ammonia Converter

Linnhoff พบว่าที่สภาวะดีที่สุดในาภาคปฏิบัติ (Best Practical) การสูญเสียจะเป็น 1,774 MJ ในขณะที่สภาวะที่ได้ในปัจจุบันเกิดการสูญเสียเป็น 1,887 MJ นั่นคือ การสูญเสียที่หลีกเลี่ยงได้จะเป็น $1,887 - 1,774 = 113 \text{ MJ}$ อนึ่ง การให้ได้มาของสภาวะดีที่สุดในาภาคปฏิบัตินั้นจะต้องคำนึงถึงประเด็นต่อไปนี้ เช่น ถ้าปฏิกิริยาเป็นประเภท Exothermic จะต้อง

- ก) ดำเนินการให้เกิดปฏิกิริยาที่สภาวะใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่จะคายพลังงานออกสูงสุด
- ข) ก่อนทำปฏิกิริยาต้องอุ่นสารให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของปฏิกิริยา และเก็บความร้อนที่ปฏิกิริยาคายออกกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด
- ค) ต้องปรับควบคุมอัตราการไหลของมวลในทั้งระบบให้เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 3.7 Exergy Losses (MJ)

UNIT	CONVENTIONAL ANALYSIS	PRACTICAL ANALYSIS
Converter feed mixing	4.4	4.4
Converter	2099.0	113.0 (AVOIDABLE)
Superheater	109.5	109.5
Waste heat boiler	629.3	629.3
Air Preheater	107.5	107.5
Cascade cooler	526.0	188.2 (AVOIDABLE)
Secondary air & NO _x mixing	0.5	0.5
Compressor	189.4	189.4
Secondary oxidation	39.3	96.1 (AVOIDABLE)
Demin water heater	112.4	112.4
Recovery heat exchanger	79.3	79.3
Absorbing tower	1142.0	24.9 (AVOIDABLE)
Recovery turbine	114.0	114.0
Recovery turbine bypass	69.9	69.9
Tail Gas Outlet	14.1	14.1
Dearator	21.4	20.6
Steam Drum	6.1	6.1
Condensing turbine	388.6	388.6
Reducing valve	12.9	12.9
Ammonia flash drum	8.5	8.5
TOTAL	5674.1	2289.3

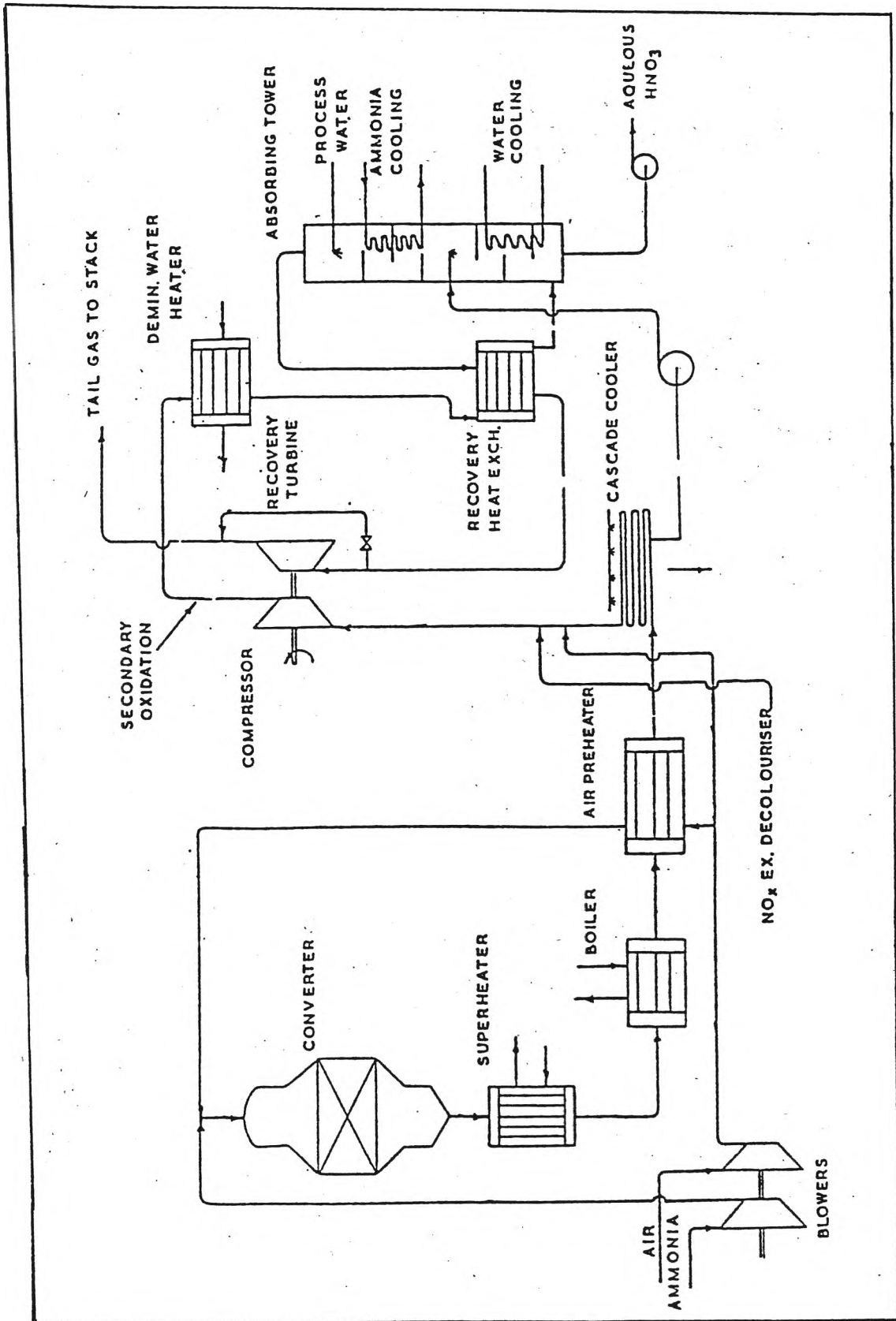
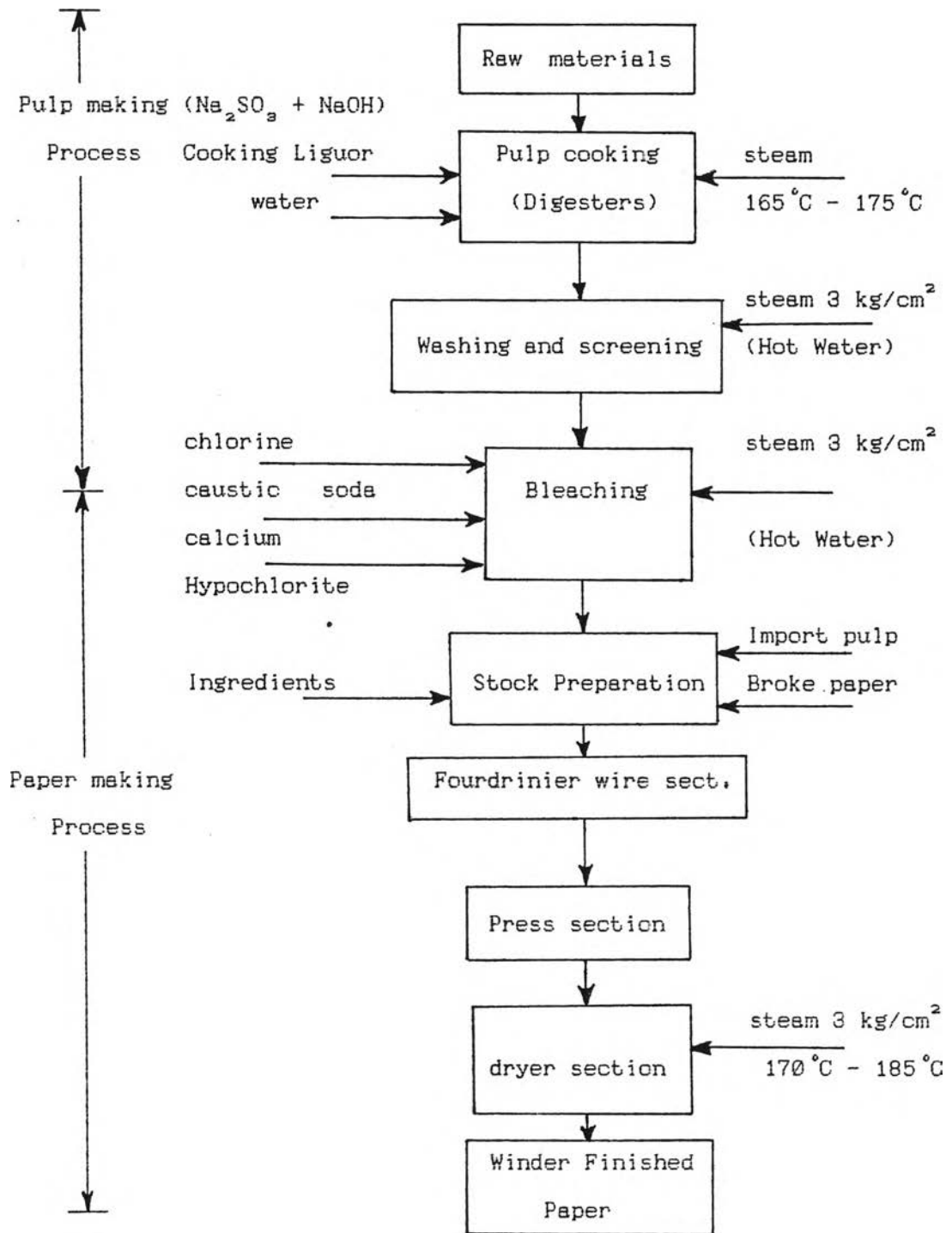


Fig. 3.8 Simplified Nitric Acid Process

3.4 ตัวอย่างที่ 4 (12)

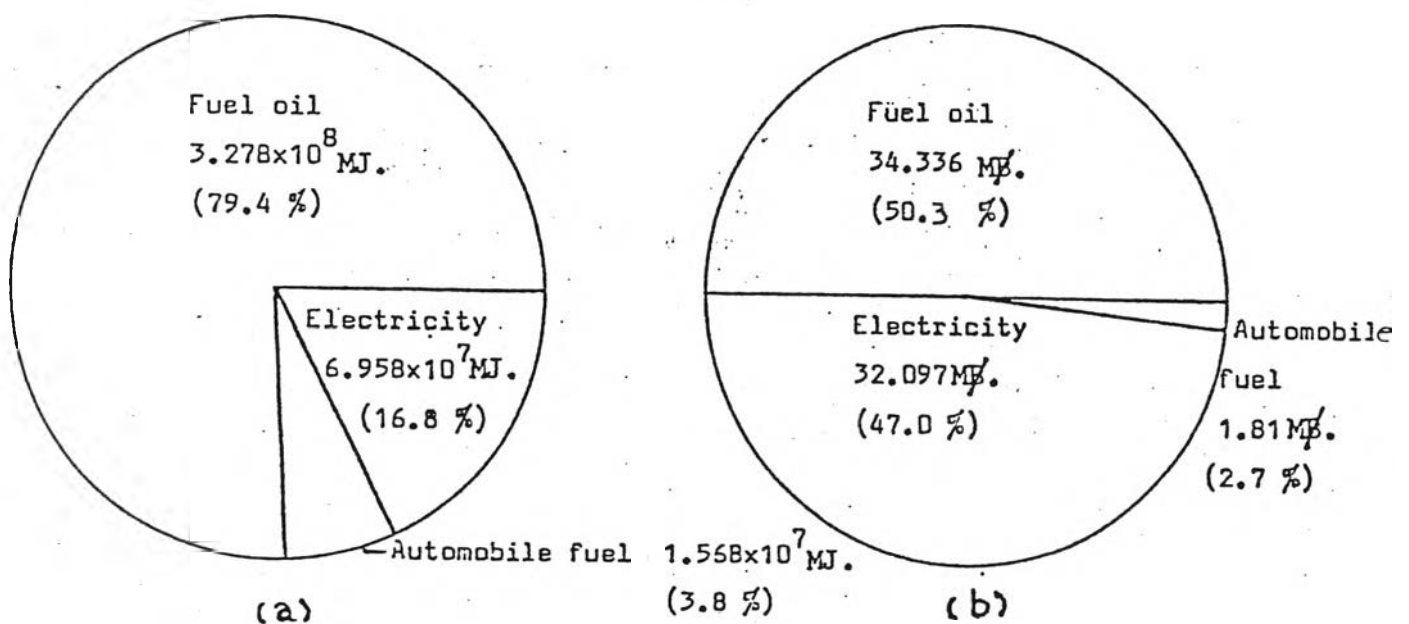
อนุศักดิ์ ได้ศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงงานกระดาษ บางปะอิน จังหวัดอยุธยา ซึ่งมีกำลังการผลิต 40 ตันกระดาษ/วัน กระบวนการผลิตของ โรงงานกระดาษนี้แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม (block diagram) ในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 Simplified Bang Pa-In Paper production process flow chart

3.8 Energy Consumption of the factory in 1983(Plant account)

Typical energy	Amount	Energy (MJ.)	Cost (MB.)	%Energy Share	%Cost Share
Fuel oil	7909821 lit	3.278×10^8	34.336	79.4	50.3
Electricity	19329420 Kw,hr	6.958×10^7	32.097	16.8	47.0
Automobile fuel	400000 lit	1.568×10^7	1.810	3.8	2.7
Total for production		4.131×10^8	68.243	100%	100%

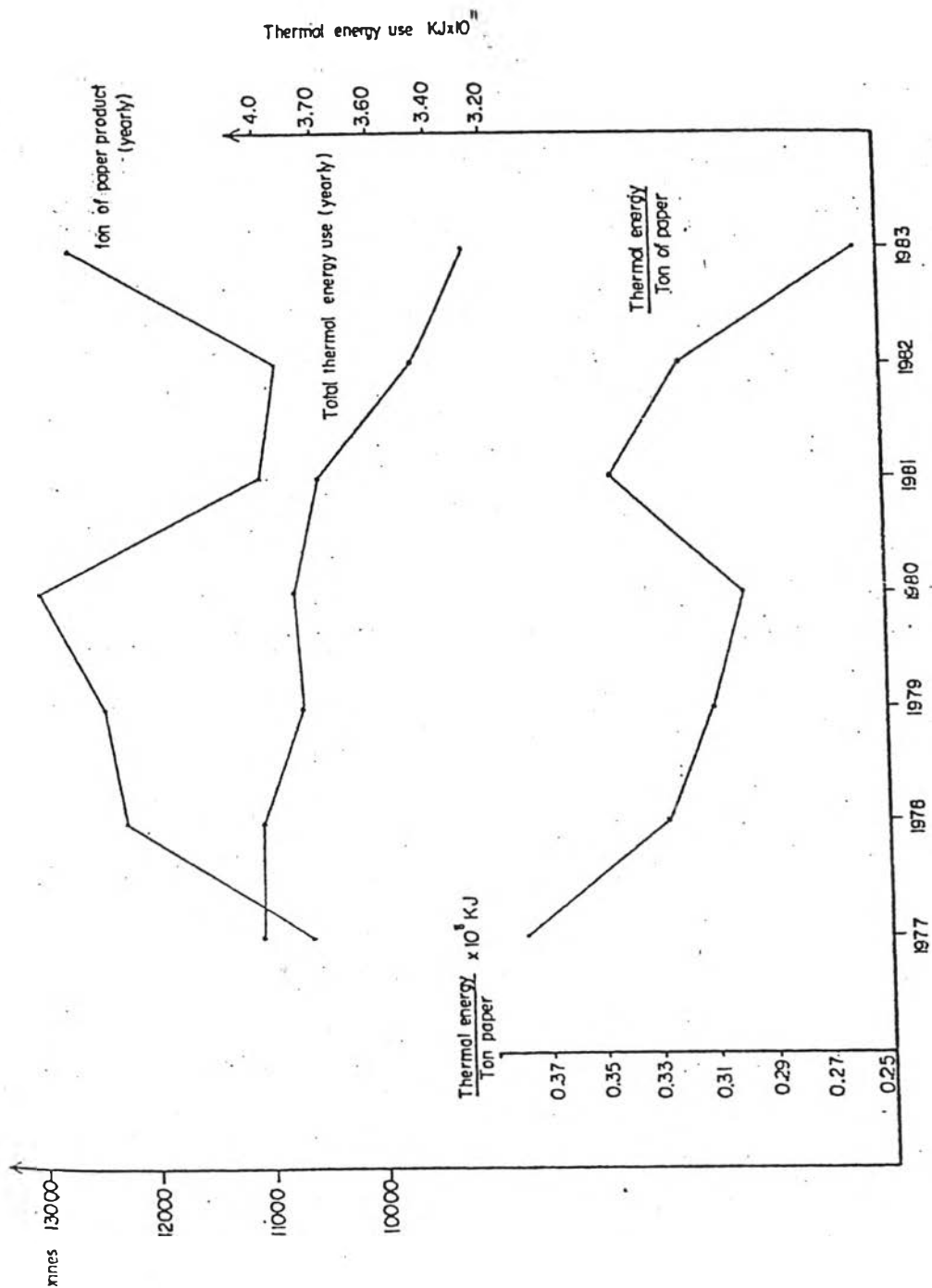


3.10 Break-down of Bang Pa-In Paper Mill Factory's Demand,

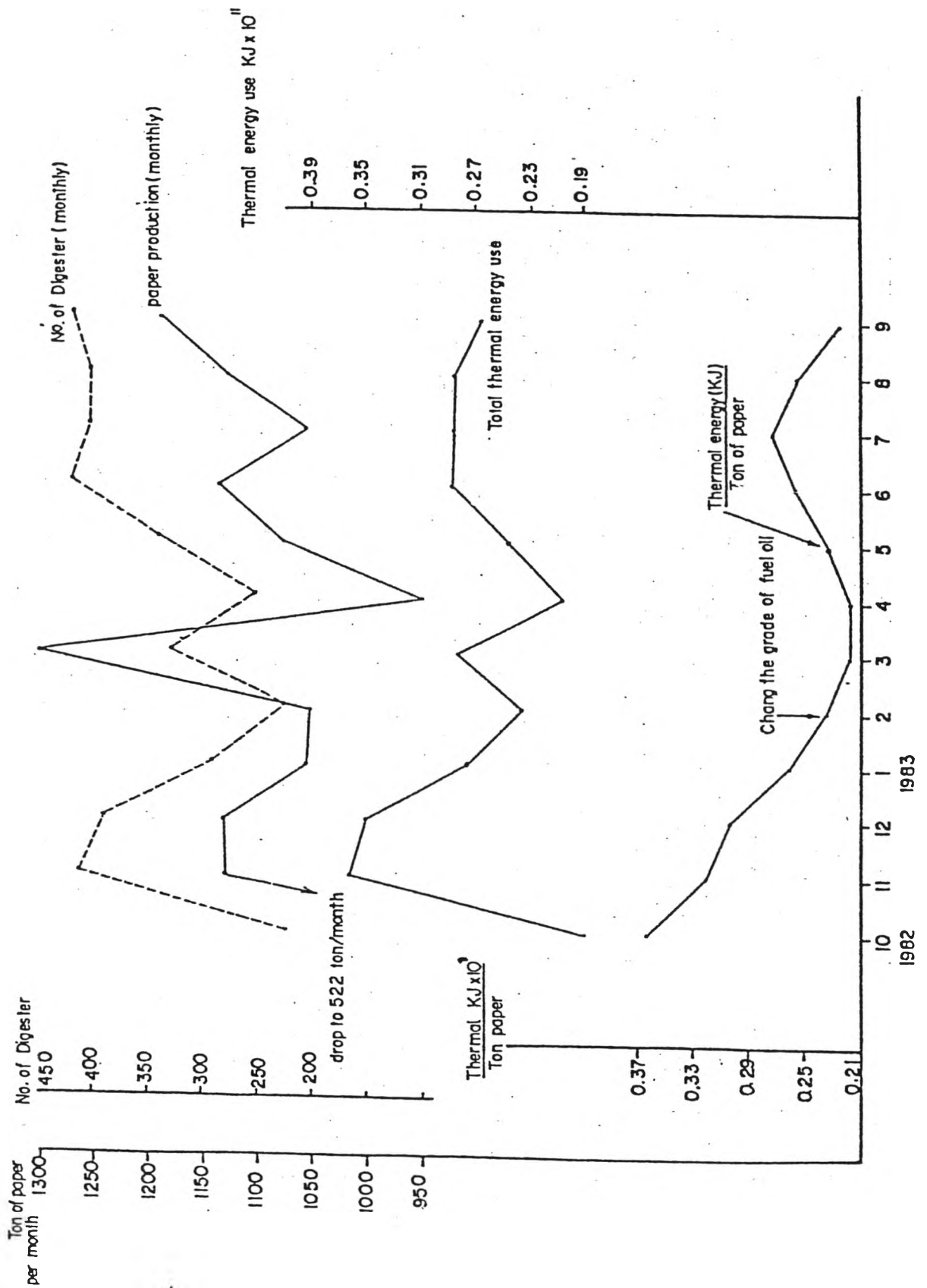
1983 (a) By Energy Type

(b) By Energy Cost

รูปที่ 3.10 จำนวนการใช้พลังงานในโรงงานสำหรับปีพ.ศ. 2526 รูปที่ 3.11 แสดงประวัติการใช้พลังงานในช่วงปีพ.ศ. 2520 ถึงพ.ศ. 2526 ส่วนรูปที่ 3.12 จำนวนการใช้พลังงานเป็นรายเดือนในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2525 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2526 ตาราง 3.8 สรุปปริมาณการใช้พลังงานในโรงงานสำหรับปีพ.ศ. 2526 อนึ่ง รูปที่ 3.13 เป็นไดอะแกรมระบบท่อของห้องหม้อไอน้ำ



รูปที่ 3.11 Historical yearly energy consumption



3.12 Monthly energy consumption

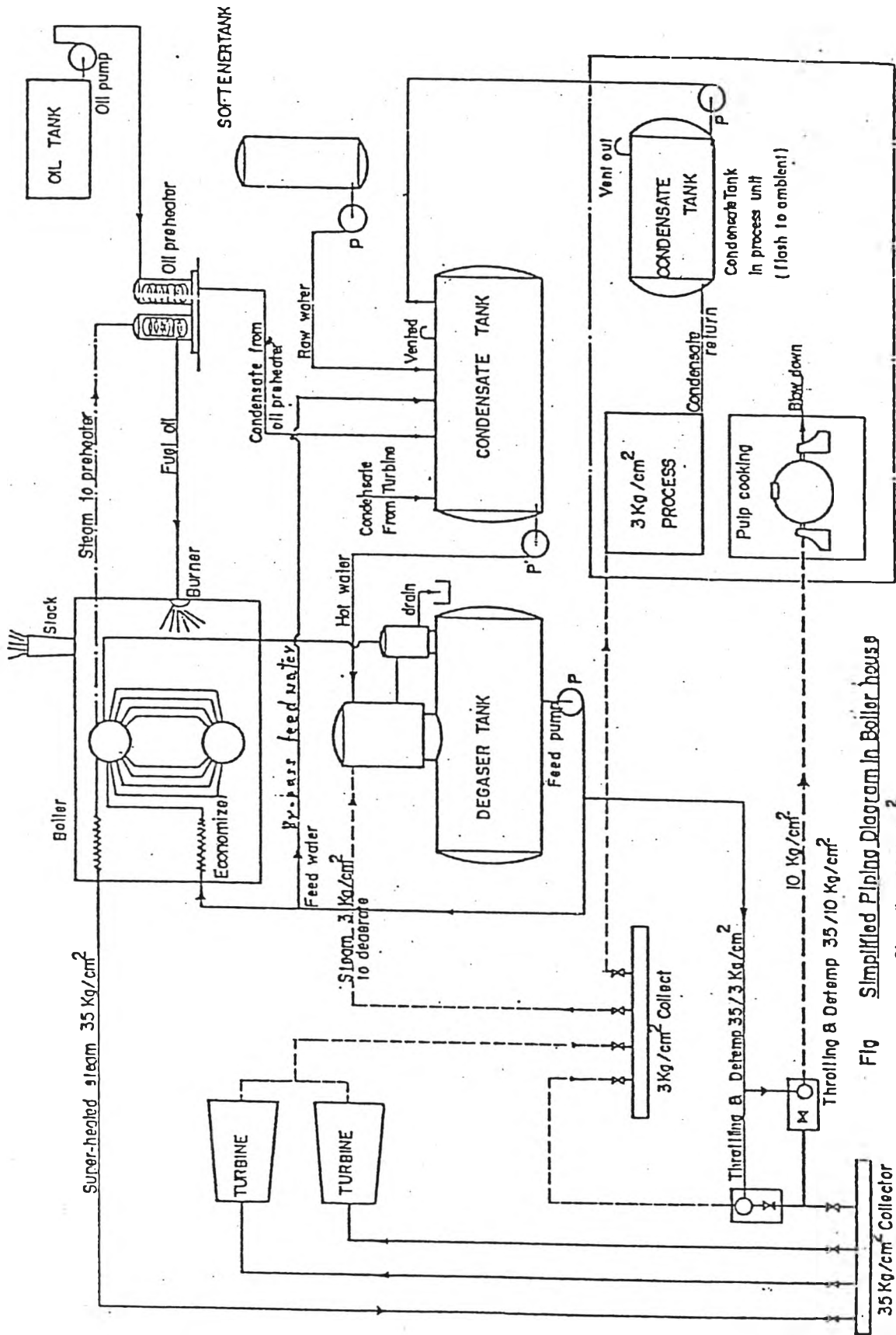


Fig 3.13 Simplified Piping Diagram in Boiler house

Fig 3.13 Simplified Piping Diagram in Boiler House

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์การใช้พลังงาน ทั้งในแง่เอ็นเธลปีและเอ็กเซอร์ยีของ อุปกรณ์แต่ละหน่วย และได้แสดงผลการวิเคราะห์เป็นตาราง (12) หลังจากนั้นได้ให้ข้อสรุป และข้อเสนอแนะในการใช้พลังงานให้ประหยัดดังนี้

1) ควบคุมปริมาณอากาศ (excess air) สำหรับการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ โดยใช้เครื่องตรวจวัด O_2 หรือ CO_2 ในไอเสียจากหม้อไอน้ำ การกระทำดังกล่าวคาดว่าจะสามารถประหยัดเงินได้ 1.7 ล้านบาท/ปี เนื่องจากราคาของเครื่องตรวจวัด O_2 นั้น ประมาณ 200,000 บาท ดังนั้นระยะเวลาคืนทุน (pay-back period) จึงประมาณ 2 เดือน

2) ทำการหุ้มฉนวนที่ผิวด้านนอกของเครื่องย่อย (digester) โดยใช้แผ่นใย แก้วหนา 4 นิ้ว ปริมาณความร้อนที่สูญหายไปจะลดลง 2,940 MJ/digester และราคาของเชื้อเพลิงคาดว่าจะประหยัดได้ 1.527 ล้านบาท เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการหุ้มฉนวน ประมาณ 470,000 บาท ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4 เดือน

3) พยายามลดปริมาณการใช้ไอน้ำลงในช่วงเวลา curing ในขบวนการ cooking การทำเช่นนี้จะช่วยประหยัดเชื้อเพลิงคิดเป็นเงิน 30,800 บาทต่อปี โดยไม่ต้องลงทุนใด ๆ

4) ถ้านำน้ำควบแน่น (condensate) ที่ได้จากอุปกรณ์แห้งชุดแรกกลับมาใช้ในกระบวนการใหม่ จะประหยัดราคาเชื้อเพลิงได้ 125,000 บาทต่อปี

5) เปลี่ยนกับดักไอน้ำ (steam trap) ใหม่เป็นชนิดลูกกลอย วิธีนี้จะประหยัดราคาเชื้อเพลิงได้ 804,700 บาทต่อปี ราคาลงทุนในการเปลี่ยนกับดักไอน้ำใหม่ประมาณ 145,000 บาท ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุน 2.2 เดือน

6) ถ้าทำการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำร่วมกัน (cogeneration) จะช่วยประหยัดเชื้อเพลิงได้ 2.6 ล้านบาท (คิดราคาเชื้อเพลิง 4.11 บาท/ลิตร และประสิทธิภาพหม้อน้ำ 78% โดยเฉลี่ย)

สรุปแล้ว ถ้าดำเนินการประหยัดพลังงานตามที่เสนอไว้ทั้งหมดจะสามารถประหยัดเงินได้ประมาณ 9.6 ล้านบาทต่อปี หรือ 14% ของราคาลงทุนทั้งหมด

3.5 ตัวอย่างที่ 5 (13)

Salih Dincer ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์พลังงานในรูปเอนโทรปี สำหรับกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงทางนิสสิกส์เช่น throttling การผสม (mixing) และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเช่น combustion process หลังจากนั้นได้เสนอรูปแบบการคำนวณเอนโทรปีในเครื่องมือต่าง ๆ เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger), เครื่องแยก (separator), heat engine, เตาเผา (furnace), กังหัน (turbine), เครื่องอัดความดัน (compressor), heat pump และ เครื่องทำความเย็น (refrigerator) ดังนี้

3.5.1 การวิเคราะห์เอนโทรปีของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงเชิงนิสสิกส์

ในกรณีการไหลแบบคงที่ เอนโทรปีของสายการไหลหาได้ดังนี้

$$Ex_1 = \Delta H_{o-1} - T_o \Delta S_{o-1} \quad (3.1)$$

1 : เป็นสภาวะที่ 1

o : เป็นสภาวะตาย (dead state) ($T_o = 25^\circ \text{C}$, $P_o = 1 \text{ atm}$)

ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะ 1 ไปยัง 2 เอนโทรปีจะเปลี่ยนไปดังนี้

$$\Delta Ex_{1-2} = H_2 - H_1 - T_o (S_2 - S_1) \quad (3.2)$$

$$\text{หรือ } \Delta Ex = \Delta H - T_o \Delta S \quad (3.3)$$

1) การหาเอนโทรปีสำหรับขบวนการ throttling

ยกตัวอย่างกรณีที่มีไอน้ำยิ่งยวดที่ 2000 kPa, 350°C ผ่านกระบวนการ throttling เหลือความดันเป็น 500 kPa

จากตารางไอน้ำและสมการ (3.1) ได้

$$\Delta Ex = 186.4 \text{ kJ/kg}$$

ที่ 2000 kPa, 350 C, ได้ $Ex = 1068.3 \text{ kJ/kg}$

$$\text{ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียเอ็กเซอร์ยี} = \frac{186.4}{1068.3} \times 100 = 17.4 \%$$

2) การหาเอ็กเซอร์ยีสำหรับกระบวนการผสม (mixing)

2.1 กรณีอุณหภูมิคงที่

$$\Delta Ex = R T_0 \sum_i x_i \ln \gamma_i x_i \quad (3.4)$$

โดย x_i = สัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบ i

γ_i = ค่า activity coefficient ของ
องค์ประกอบ i ในสารละลาย

ถ้าสารละลายเป็นสารละลายอุดมคติ $\gamma_i = 1$ นั่นคือ

$$\Delta Ex = R T_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (3.5)$$

2.2 กรณีความดันคงที่

$$Ex = C_{p, \text{mean}} \sum (T_1 - T_0) - T_0 C_{p, \text{mean}} \sum_i \ln (T_1/T_0) \quad (3.6)$$

3.5.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีสำหรับกระบวนการทางเคมี

$$\Delta Ex = \Delta G_{F, F}^{\circ} - \sum_j n_j \Delta G_{j, F}^{\circ} \quad (3.7)$$

ในที่นี้ n_j = จำนวนโมลของผลผลิต j

ΔG° = standard Gibb's free energy'

f = ปฏิิกิริยาของการสร้างตัว (formation)

อนึ่ง เอ็กเซอร์ยีของกระบวนการเคมีที่ไม่ได้อยู่สภาวะมาตรฐานสามารถคำนวณได้จาก

$$Ex_j = Ex^\circ + \Delta Ex_{o-j} \quad (3.8)$$

3.5.3 การหาประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สอง

3.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\epsilon = \frac{\Delta Ex_{\text{cold stream}}}{\Delta Ex_{\text{hot stream}}} \quad (3.9)$$

3.2 เครื่องแยกสาร (Seperator)

$$\epsilon = \frac{\sum \Delta Ex_{\text{nonsource and nonpurge streams}}}{\sum Ex_{\text{utility supplied}}} \quad (3.10)$$

ในที่นี้ $Ex_{\text{utility supplied}} = Q_H [1 - (T_o/T_H)] - Q_C [1 - (T_o/T_C)]$ (3.11)

T_H = อุณหภูมิคงที่ที่ให้ความร้อน [เช่น เครื่องต้มซ้ำ (reboiler)]

T_C = อุณหภูมิคงที่ที่ดึงความร้อนออก [เช่น เครื่องควบแน่น (condenser)]

$$\sum Ex_{\text{nonsource and nonpurge stream}} = \sum Ex_{\text{all useable outlet}} - \sum Ex_{\text{feed}} + \Delta Ex_{\text{sep}} \quad (3.12)$$

กล่าวโดยสรุปแล้ว บทความนี้ได้อธิบายวิธีคำนวณหาเอ็กเซอร์ยีและประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สอง ผู้ที่สนใจรายละเอียดเพิ่มเติมอาจหาอ่านจาก (13)

3.6 ตัวอย่างที่ 6 (11)

นายมนตรี อึ้งเจริญ ได้ศึกษาการวิเคราะห์พลังงานความร้อนที่โรงงานอาหารรถยนต์แห่งหนึ่ง โดยเน้นหน่วยปฏิบัติการเป็นหน่วย ๆ ไป เช่น ระบบการใช้ไอน้ำ, เตาไฟฟ้าสำหรับเบรค, ระบบการใช้เตาหลอม, เตาอบ-ชุบไฟฟ้า, เตาอบชิ้นงาน เป็นต้น

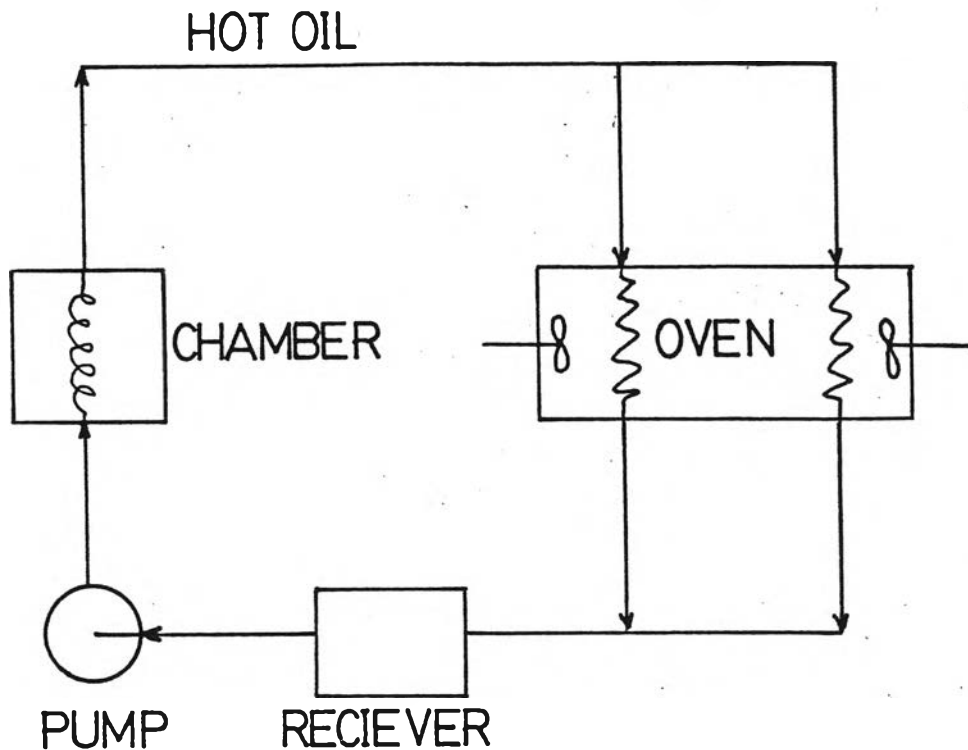
จากผลการวิเคราะห์พบว่า

ระบบการใช้ไอน้ำมีค่า	$\eta = 11 \%$, $\epsilon = 1 \%$
เตาไฟฟ้าสำหรับเบรค	$\eta = 26 \%$, $\epsilon = 3 \%$
เตาหลอม	$\eta = 32 \%$, $\epsilon = 21 \%$
เตาอบ-ชุบไฟฟ้า	$\eta = 13 \%$, $\epsilon = 6 \%$
เตาเผาชิ้นงาน	$\eta = 3-20 \%$, $\epsilon = 1-11 \%$

ในกรณีของระบบการใช้ไอน้ำ ได้ประเมินค่าใช้จ่ายเป็นเงิน 214,665 บาทต่อปี ซึ่งในจำนวนนี้เป็นค่าพลังงานสูญเสีย 190,424 บาทต่อปี ค่าเอ็กเซอร์ยีที่สูญเสีย 53,987 บาทต่อปี และค่าการย้อนกลับไม่ได้ 157,860 บาทต่อปี ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำยังไม่ดีพอ ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงมีดังนี้

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์เก็บน้ำควบแน่น (condensate) กลับมาใช้ประโยชน์
- 2) ลดความร้อนที่หนีไปกับก๊าซทิ้งร้อน
- 3) หุ้มฉนวนระบบท่อจ่ายไอน้ำและติดตั้งอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบ

ในกรณีของเตาอบเบรคที่ใช้ไฟฟ้า พบว่า $\eta = 26 \%$ และ $\epsilon = 3 \%$ ซึ่งประเมินเป็นค่าใช้จ่าย 61,926 บาทต่อปี ในจำนวนนี้เป็นค่าพลังงานสูญเสีย 45,887 บาทต่อปี, ค่าเอ็กเซอร์ยีสูญเสีย 4,180 บาทต่อปี และค่าการย้อนกลับไม่ได้ 55,758 บาทต่อปี ได้เสนอแนะให้เปลี่ยนแหล่งบ่อนพลังงานใหม่ โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตลมร้อนสำหรับอบเบรค อากาศเย็นจะถูกทำให้ร้อนโดยใช้น้ำมันร้อนในชุดท่อ ซึ่งออกจากห้องเผาไหม้แล้วไหลเวียนกลับไปถึงเก็บน้ำมันในลักษณะระบบปิด ดังแสดงในรูป 3.14



รูปที่ 3.14 Closed loop for improving

ข้อเสนอแนะอื่น ๆ มีอาทิเช่น หุ้มฉนวนผนังของเตาอบเบรค

ในกรณีของเตาหลอม ปรากฏว่าประสิทธิภาพ $\eta = 32\%$ และ $\epsilon = 21\%$ ซึ่งประเมินเป็นค่าใช้จ่าย 4,038,332 บาทต่อปี ในจำนวนนี้เป็นค่าพลังงานสูญเสีย 2,734,441 บาทต่อปี, ค่าเอ็กเซอร์ยีสูญเสีย 344,450 บาทต่อปี และค่าการย้อนกลับไม่ได้ 2,827,925 บาทต่อปี พบว่าปัญหาที่พลังงานส่วนใหญ่ที่สูญเสียเนื่องมาจาก การระบายความร้อนของน้ำหล่อเย็นของขดลวดร้อน โดยต้องใช้หอระบายความร้อน หลังจากทำการวิเคราะห์พบว่า หอระบายความร้อนไม่เหมาะสมกับการใช้งานเพราะไม่เพียงพอกับภาระกรรม (load) แต่ในระบบการใช้เตาหลอมจะให้ผลค่อนข้างดีพอใช้ สำหรับการใช้จ่ายพลังงานเป็นไฟฟ้าพบว่า ถ้าปรับปรุงจะประหยัดค่าใช้จ่ายได้ปีละ 466,680 บาท

ในกรณีของเตาอบ-ชุบไฟฟ้าพบว่า ประสิทธิภาพ $\eta = 13\%$ และ $\epsilon = 6\%$ ซึ่งประเมินเป็นค่าใช้จ่าย 352,400 บาทต่อปี ในจำนวนนี้เป็นค่าพลังงานสูญเสีย 306,145 บาทต่อปี, ค่าเอ็กเซอร์ยีสูญเสีย 147,508 บาทต่อปี และค่าการย้อนกลับไม่ได้ 185,683 บาทต่อปี จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่ใช้ออกแบบไม่ดีพอ และควรจะปรับปรุงดังนี้

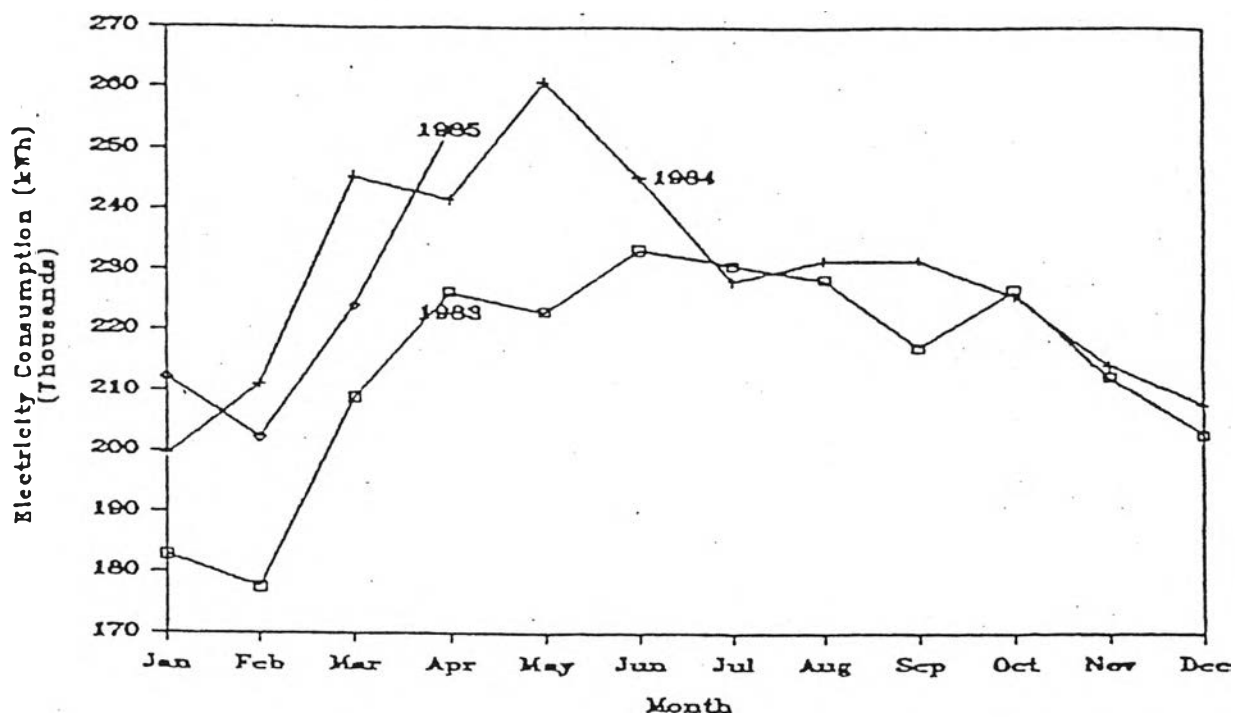
- 1) ออกแบบฐานรับชิ้นงานให้เหมาะสม
- 2) หุ้มฉนวนผนังเตา
- 3) ออกแบบแผ่นเหล็กกันขดลวดความร้อนให้เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์หน่วยงานแต่ละหน่วยแล้ว นำมาคิดค่าใช้จ่ายรวมของพลังงานที่ให้กระบวนการผลิตพบว่าเป็นเงิน 7,446,642 บาทต่อปี ในจำนวนนี้ค่าเอ็กเซอร์ยีสูญเสียเท่ากับ 1,733,336 บาทต่อปี และค่าเอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเท่ากับ 4,737,916 บาทต่อปี หลังจากเสนอแนะให้ปรับปรุงแล้ว ประเมินค่าการประหยัดพลังงานที่สูญเสียได้ 448,971 บาทต่อปี หรือประมาณ 6% ของค่าพลังงานที่ป้อนเข้าทั้งหมด

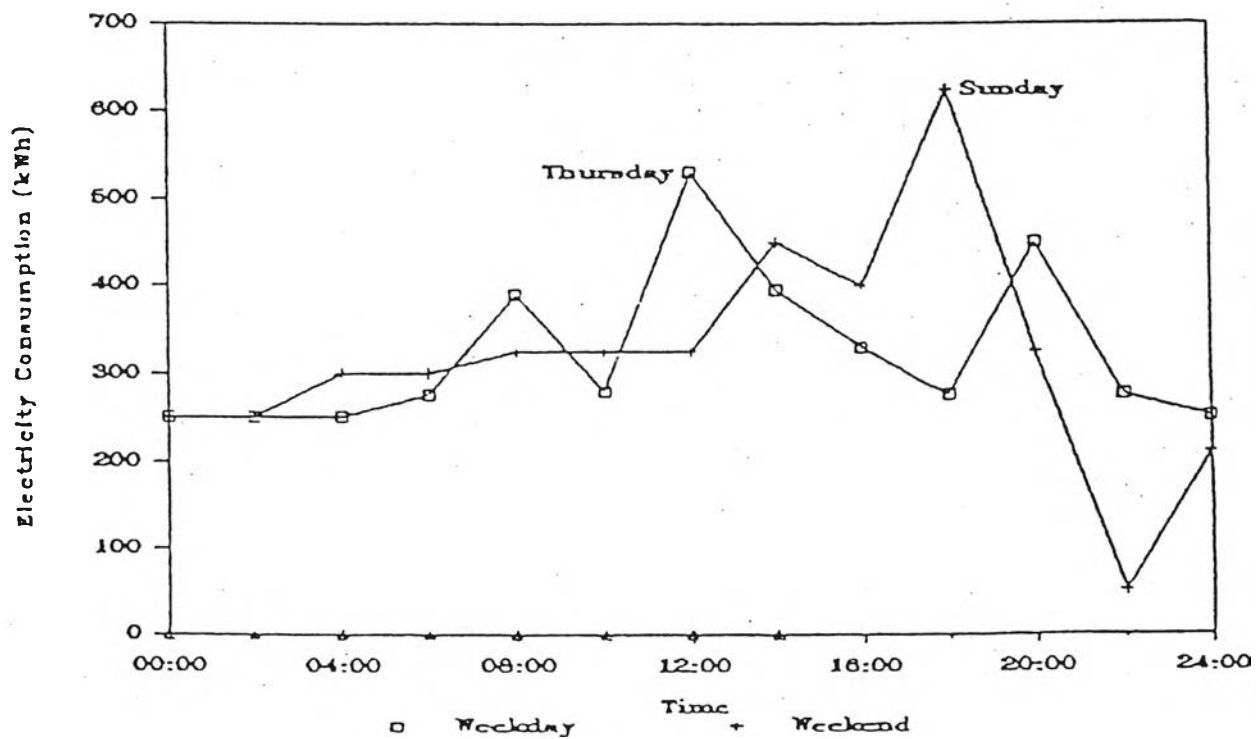
3.7 ตัวอย่างที่ 7 (10)

ดร. ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์ ได้ศึกษาวิเคราะห์พลังงานของโรงพยาบาลเอกชนแห่งหนึ่งในกรุงเทพ โดยใช้แนวคิดของ อเวลาบิลิตี พบว่าโรงพยาบาลแห่งนี้ในปี 1984 ได้ใช้พลังงานไป 1.64 million MJ หรือคิดเป็นเงิน 5.84 ล้านบาท โดยแบ่งชนิดของพลังงานได้เป็น พลังงานไฟฟ้า 60.4% และพลังงานดีเซล 39.6% ในแง่ของค่าใช้จ่ายแล้วพบว่าพลังงานไฟฟ้าสิ้นเปลืองประมาณ 81.0% และพลังงานดีเซล 19.0% ของค่าใช้จ่ายพลังงานทั้งหมด

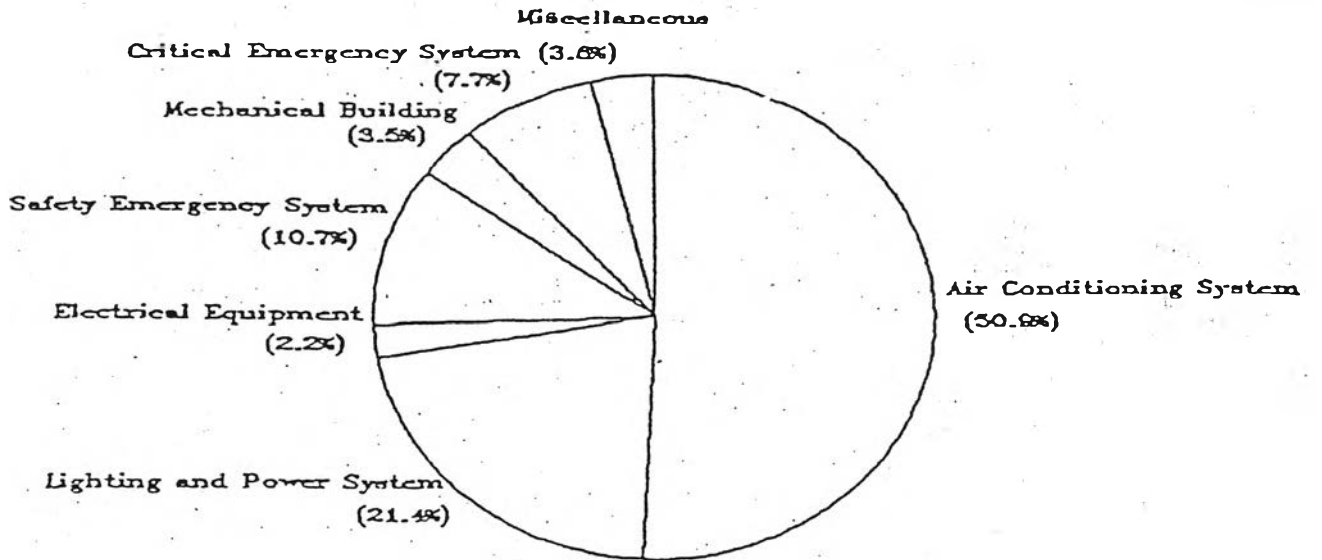
รูป 3.15 ถึง 3.18 แสดงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า และดีเซลของโรงพยาบาลแห่งนี้



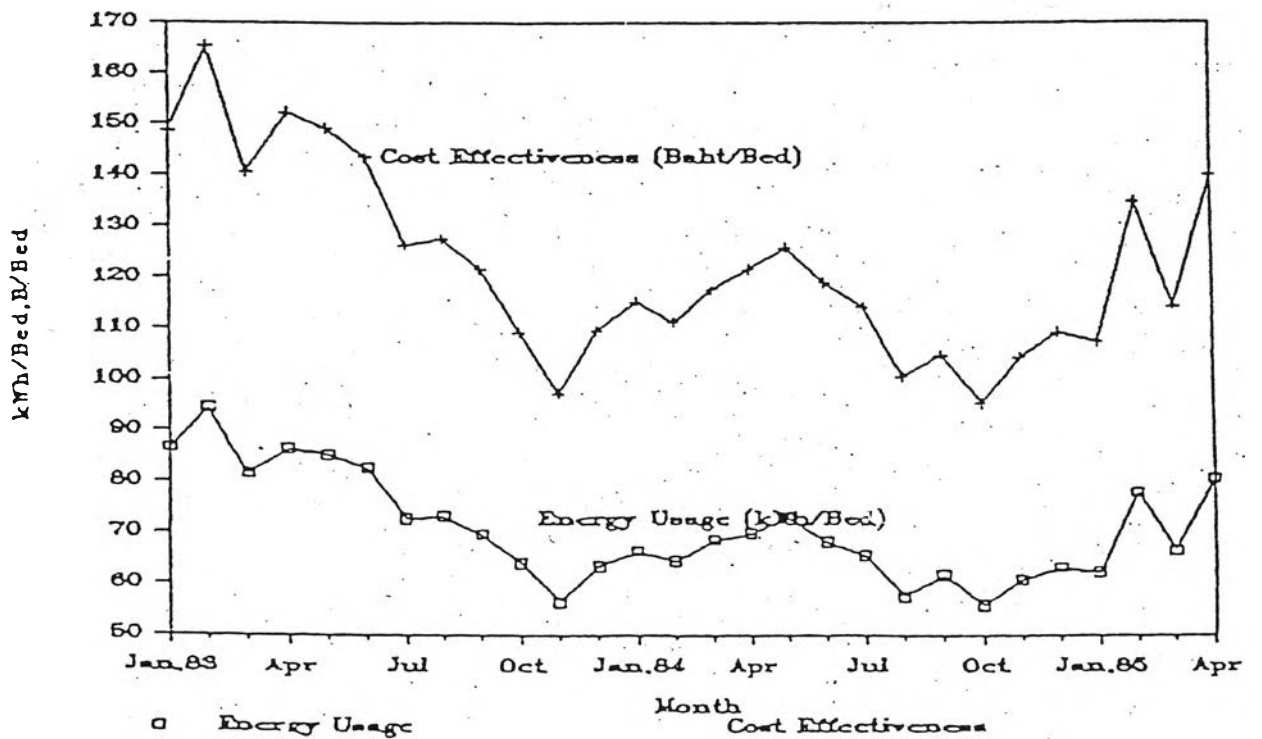
ရုပ်ပုံ 3.15 Electricity Consumption of BH, Jan 1983-Apr. 1985



ရုပ်ပုံ 3.16 Electricity Demand Two Hour Periods Characteristics.



รูปที่ 3.17 Electricity Consumption of Major Users



รูปที่ 3.18 Energy Usage Index and Cost Effectiveness, 1983-1985

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์เอ็นทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เบอร์ 1 และเบอร์ 2 แล้วนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบให้ดูในตาราง 3.9

ตาราง 3.9 Summary of Chillers Performances

Performance	Chiller No.1		Chiller No.2	
	Full Load	Part Load	Full Load	Part Load
Compression efficiency	0.920	0.819	0.860	0.828
Condenser effectiveness	0.146	0.107	0.170	0.111
Evaporator effectiveness	0.425	0.428	0.420	0.400
COP	3.73	3.59	3.73	3.49
Second law efficiency	0.300	0.288	0.300	0.280

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ทั้งเครื่องทำน้ำเย็นเบอร์ 1 และเบอร์ 2 มีสมรรถภาพที่ใกล้เคียงกัน และสมรรถภาพที่สภาวะภาระต่ำจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าสภาวะภาระเต็มทั้งสองเครื่อง ดังนั้นในการที่จะให้เครื่องทำงานให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นควรจะให้ทำงานที่สภาวะภาระเต็มของเครื่องใดเครื่องหนึ่ง มากกว่าให้ทั้งสองเครื่องทำงานพร้อมกันที่สภาวะภาระต่ำ

ผลการวิเคราะห์เครื่องผลิตไอน้ำเบอร์ 1 และเบอร์ 2 มีแสดงไว้ในตาราง 3.10

ตาราง 3.10 Comparison of Steam Generation Performances

	Generator No.1	Generator No.2
Excess air, %	71.3	31.8
First law efficiency, %	78.7	84.8
Second law efficiency, %	23.8	25.4
Availability loss with flue gas, %	4.5	2.8
Irreversibilities, %	71.1	71.5
Availability loss due to heat transfer,%	0.6	0.3

จากตารางที่ 3.10 พบว่า หม้อไอน้ำเบอร์ 1 มีเอ็กเซอร์ยีที่สูญเสียมากกว่าเบอร์ 2 เนื่องจากใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของเบอร์ 1 น้อยกว่าเบอร์ 2 ส่วนค่าการย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักจากการวิเคราะห์นี้ทำให้ขอเสนอแนะในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องดังนี้

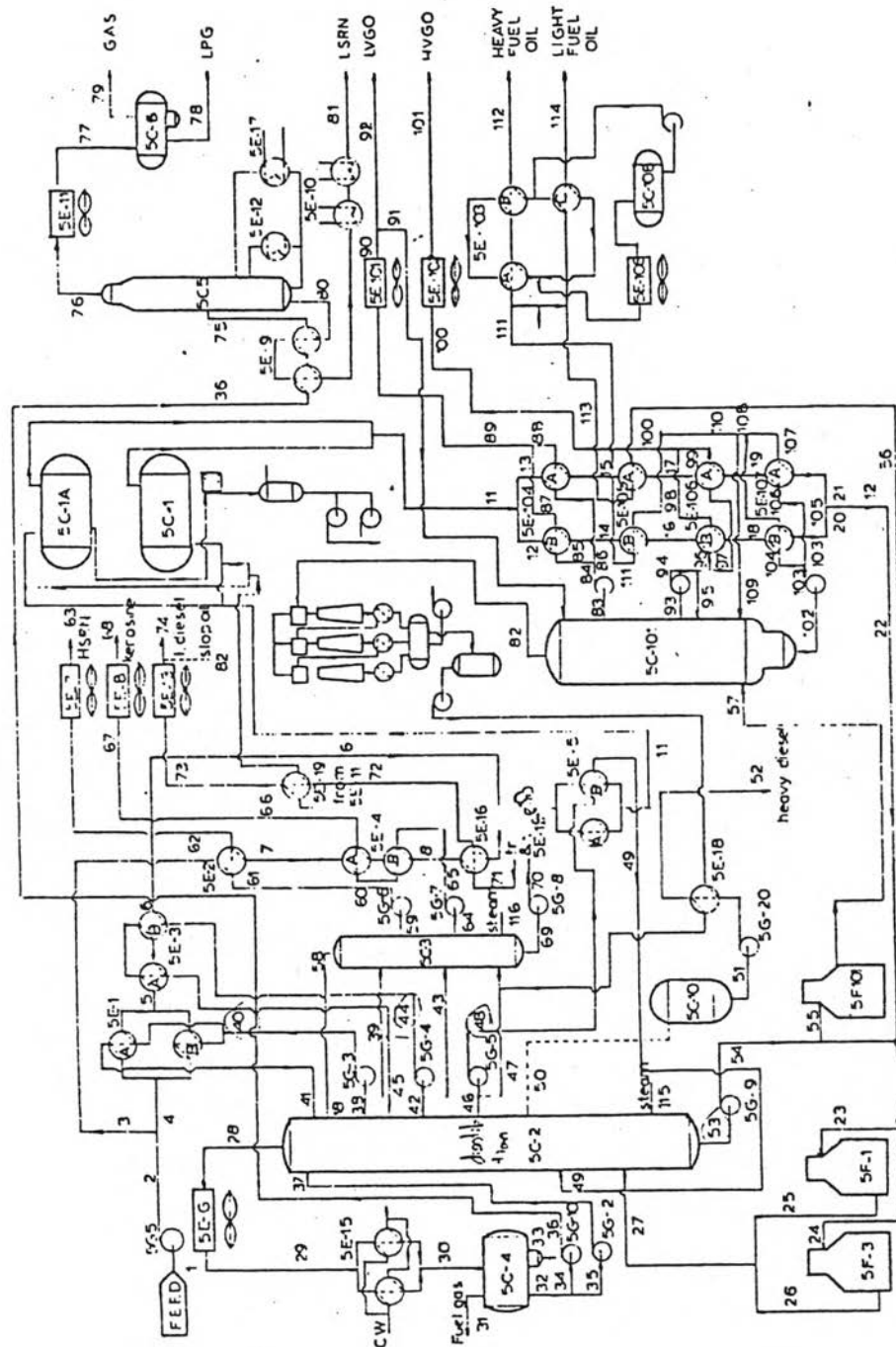
- 1) ควรใช้น้ำมันเกรดต่ำแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งราคาแพง
- 2) เนื่องจากหม้อไอน้ำเบอร์ 2 มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เป็น 84.8% จึงควรใช้ทำงานมากกว่าเบอร์ 1 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่า
- 3) ควรเพิ่มประสิทธิภาพของเบอร์ 1 โดยใช้หัวเผาที่ดีกว่าเดิมเพื่อให้สามารถทำการสันดาปสมบูรณ์โดยใช้อากาศส่วนเกินน้อยลง ผลก็คือช่วยลดการสูญเสียพลังงานไปกับก๊าซทิ้งได้

3.8 ตัวอย่างที่ 8 (9)

S. Dincer และ D. Erkan

ได้ศึกษาการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีใน

กระบวนการกลั่นน้ำมัน โดยได้เน้นถึงการสูญเสียของเอ็กเซอร์ยีในหน่วยหลักของกระบวนการ
แผนผังของขบวนการกลั่นน้ำมันนี้แสดงไว้ในรูป 3.19



รูปที่ 3.19 Flow-sheet of the considered refinery

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีที่สูญเสียได้คำนวณจากสมการ (3.13)

$$\Delta Ex_{\text{loss}} = \sum Ex_{\text{input}} - \sum Ex_{\text{useful output}} \quad (3.13)$$

ผลการวิเคราะห์ในหน่วยต่าง ๆ มีสรุปในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 Losses of Available Power in the Refinery²

Unit	Loss of available power (kJh ⁻¹)x10 ⁻⁵	% of total available energy loss
5C-2	48.00	1.79
5C-3	7.200	0.27
5C-4	1.050	0.04
5C-6	1.012	0.04
5C-101	123.0	4.59
5F-1	785.2	29.3
5F-3	485.6	18.1
5F-103	369.9	13.8
Heat exchangers before de-salters	157.0	5.86
Heat exchangers after de-salters	90.68	3.39
Air coolers	296.4	11.1
Water coolers	206.8	7.72
Pumps	24.54	0.92
Other losses	81.62	3.05
Total loss	2678	100

ผลการวิเคราะห์พบว่า การสูญเสียเอ็กเซอร์ยีเกิดขึ้นมาก ที่สำคัญ ๆ ได้แก่ ที่ เตาเผา (furnaces) ดังต่อไปนี้

เตาเผา	5F-1	=	29.3 %
เตาเผา	5F-3	=	18.1 %
เตาเผา	5F-103	=	13.8 %

ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนผ่านเครื่องกำจัดเกลือ (de-salter)	=	5.86 %
ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลังผ่านเครื่องกำจัดเกลือ (de-salter)	=	3.39 %
ที่เครื่องระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air coolers)	=	11.1 %
ที่เครื่องระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water coolers)	=	7.72 %

งานวิจัยนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะดังนี้

ประเด็นที่ 1)

สาเหตุที่การสูญเสียของเอ็กเซอร์ยีที่เตาเผาที่มีค่าสูงนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่อง จากสูญเสียไปกับก๊าซทิ้ง (flue gas) ร้อนที่ถูกปล่อยออกไป เพื่อที่จะเป็นการสงวน พลังงานไว้ให้ได้มากนั้น ควรจะนำก๊าซทิ้งร้อนนั้น ไปอุ่นอากาศก่อนที่จะเข้าสู่เตาเผา หรือนำ ไปอุ่นน้ำบ่อนก่อนที่จะบ่อนเข้าหม้อไอน้ำ

ประเด็นที่ 2)

ที่หน่วยของเครื่องระบายความร้อนด้วยอากาศ หรือเครื่องระบายความร้อนด้วย น้ำ การสูญเสียของเอ็กเซอร์ยีก็มีค่าสูงเช่นกัน ควรจะมีการอินทิเกรตความร้อน (heat integration) เพื่อเป็นการสงวนพลังงานให้ใช้เป็นประโยชน์

สัญลักษณ์ที่ใช้ในโฟลว์ชีท (Flow sheet) ที่สำคัญได้แก่

5C-1, -1A	Desalters
5C-2	Atmospheric distillation column
5C-3	Stripper
5C-4, -6	Drums
5C-5	De-butanizer
5C-101	Vecumn-distillation column
5E-number	Heat exchangers, air or water coolers
5F-number	Furnaces

3.9 ตัวอย่างที่ 9 (18)

วิวัฒน์ ได้ศึกษาการวิเคราะห์เอ็นรัลป์ร่วมกับเอ็กเซอร์ซีของโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี โดยได้เน้นถึงสภาพการใช้พลังงานของโรงงานก่อนและหลังการปรับปรุงเครื่องจักรอุปกรณ์ พบว่าก่อนทำการปรับปรุงการใช้พลังงานหลัก ๆ เป็นดังนี้:

ที่ระบบผลิตไอน้ำ	6.13×10^6	kcal/ตันน้ำตาล
ที่ระบบกระบวนการผลิตน้ำตาล	4.15×10^6	kcal/ตันน้ำตาล

เมื่อวิเคราะห์โดยเอ็กเซอร์ซีพบว่า

ที่ระบบผลิตไอน้ำ	6.62×10^6	kcal/ตันน้ำตาล
ที่ระบบกระบวนการผลิตน้ำตาล	1.05×10^6	kcal/ตันน้ำตาล

หลังการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนหม้อไอน้ำลูกใหม่จาก 20 t/h เป็น 50 t/h และเปลี่ยนเครื่องปั่นไฟน้ำลูกใหม่จาก 2,500 kW เป็น 5,000 kW พบว่า

การใช้พลังงาน ที่ระบบผลิตไอน้ำ	5.87×10^6	kcal/ตันน้ำตาล
ที่ระบบกระบวนการผลิตน้ำตาล	6.35×10^6	kcal/ตันน้ำตาล

เมื่อวิเคราะห์โดยเอ็กเซอร์ซีพบว่า

ที่ระบบผลิตไอน้ำเป็น	4.22×10^6	kcal/ตันน้ำตาล
ที่ระบบกระบวนการผลิตน้ำตาล	7.90×10^6	kcal/ตันน้ำตาล

และในงานวิจัยนี้ได้เน้นถึงต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยผลผลิตด้วย โดยทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง และได้หาระยะเวลาคืนของการดำเนินการปรับปรุงด้วย

3.10 บทความอื่น ๆ

นอกจากตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีบทความที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เอ็กเซอร์ยีกจำนวนพอสมควร ในที่นี้จะเสนอรายชื่อของบทความส่วนหนึ่งที่คิดว่าน่าสนใจดังต่อไปนี้

- 1) W. Schultz and A. Bejan, "Exergy Conservation in Parallel Thermal Insulation Systems", Int. J. Heat Mass Transfer , Vol 26, No.3, pp 335-340, 1983.
- 2) T. J. Kotas, "Exergy Method of Thermal and Chemical Plant Analysis", Chem. Eng. Res. Des. , Vol 64, May 1986, pp 212-229
- 3) R. A. Gaggioli and P. J. Petit, "Use The Second Law First", CHEMTECH , August 1977 , pp 496-506
- 4) Noel de Nevers, "The Second Way to Use The Second Law", CHEMTECH , May 1982, pp 306-317
- 5) G. M. Reistad, "Available Energy Conversion and Utilization in the United States", Journal of Engineering for Power , July 1975, pp 429-434
- 6) John C. Chato and Charalambos Damianides, "Second-law-based optimization of heat exchanger networks using load curves", Int. J. Heat Mass Transfer , Vol 29, No.8, pp 1079-1086, 1986.