

หลัก (ในภาพผนวกที่ ก2) จากนั้นทำการคลิกที่ปุ่มเลือก Pipe โปรแกรมจะแสดงรูปภาพประกอบ และปุ่มคำสั่ง Input ให้ผู้ใช้คลิกที่ปุ่มคำสั่งเพื่อที่จะกำหนดรายละเอียดด้านท่อซึ่งมีรายละเอียดดัง ภาพผนวกที่ ก5

สำหรับการกำหนดขนาดท่อมาตรฐานพิจารณาจากตารางผนวกที่ ก2 และ ก3 ซึ่งประกอบด้วยค่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก และความหนาต่อ ส่วนค่า การนำความร้อนของท่อพิจารณาจากตารางผนวกที่ ก5 เพื่อนำมาป้อนค่าในรายละเอียดของท่อ

ภาพผนวกที่ ก5 หน้าจอแสดงการเลือกขนาดท่อและค่าความนำความร้อนของท่อ เมื่อคลิกที่ Pipe ของหน้าจอหลัก

หลังจากป้อนข้อมูลรายละเอียดท่อแล้วเปลี่ยนความร้อนเสร็จแล้ว ทำการคลิกที่ปุ่ม Calculate เพื่อย้อนกลับไปยังหน้าจอหลัก จากนั้นคลิกที่ปุ่มเลือก Shell side โปรแกรมจะแสดงรูปภาพประกอบและปุ่มคำสั่ง Input เมื่อคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Input โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Shell side เพื่อป้อนข้อมูลด้านเซลล์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งประกอบด้วย ค่าสมบัติทางกายภาพของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ย อัตราการไหลของของไหลด้านเซลล์ (น้ำเย็นในงานวิจัยนี้) และค่าสมบัติทางกายภาพของของไหลที่อุณหภูมิผนังท่อ ซึ่งประกอบด้วย Specific heat, Viscosity, Thermal conductivity ให้นำรายละเอียดของค่าเหล่านี้ไปใส่ลงในช่องรับข้อมูลดังภาพผนวกที่ ก6 โดยอัตราการไหลของน้ำเย็นสามารถหาได้จากปริมาณน้ำป้อนถึงน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ส่วนค่าสมบัติทางกายภาพของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิผนังท่อหาได้จากตารางผนวกที่ ก4 ซึ่งจะได้ค่า ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ ความหนืด และการนำความร้อน จากนั้นเมื่อป้อนข้อมูลด้านเซลล์ครบแล้วให้คลิกที่ปุ่ม Calculate เพื่อกลับไปยังหน้าจอหลัก

Heat Exchanger Design

Shell side

Shell side fluid properties

Density	991.2	kg/m ³
Specific heat	4.178	kJ/kg K
Viscosity	0.000615	Pa.s
Thermal conductivity	0.639	W/m K
Total flow rate	0.321	kg/s

Shell surface fluid properties

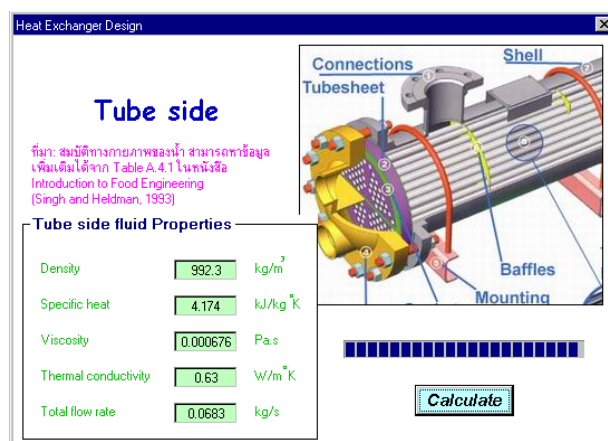
Specific heat	4.1826	kJ/kg K
Viscosity	0.000703	Pa.s
Thermal conductivity	0.633	W/m K

ที่มา: สมบัติทางกายภาพของน้ำสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก Table A.4.1 ในหนังสือ Introduction to Food Engineering (Singh and Heldman, 1993)

Calculate

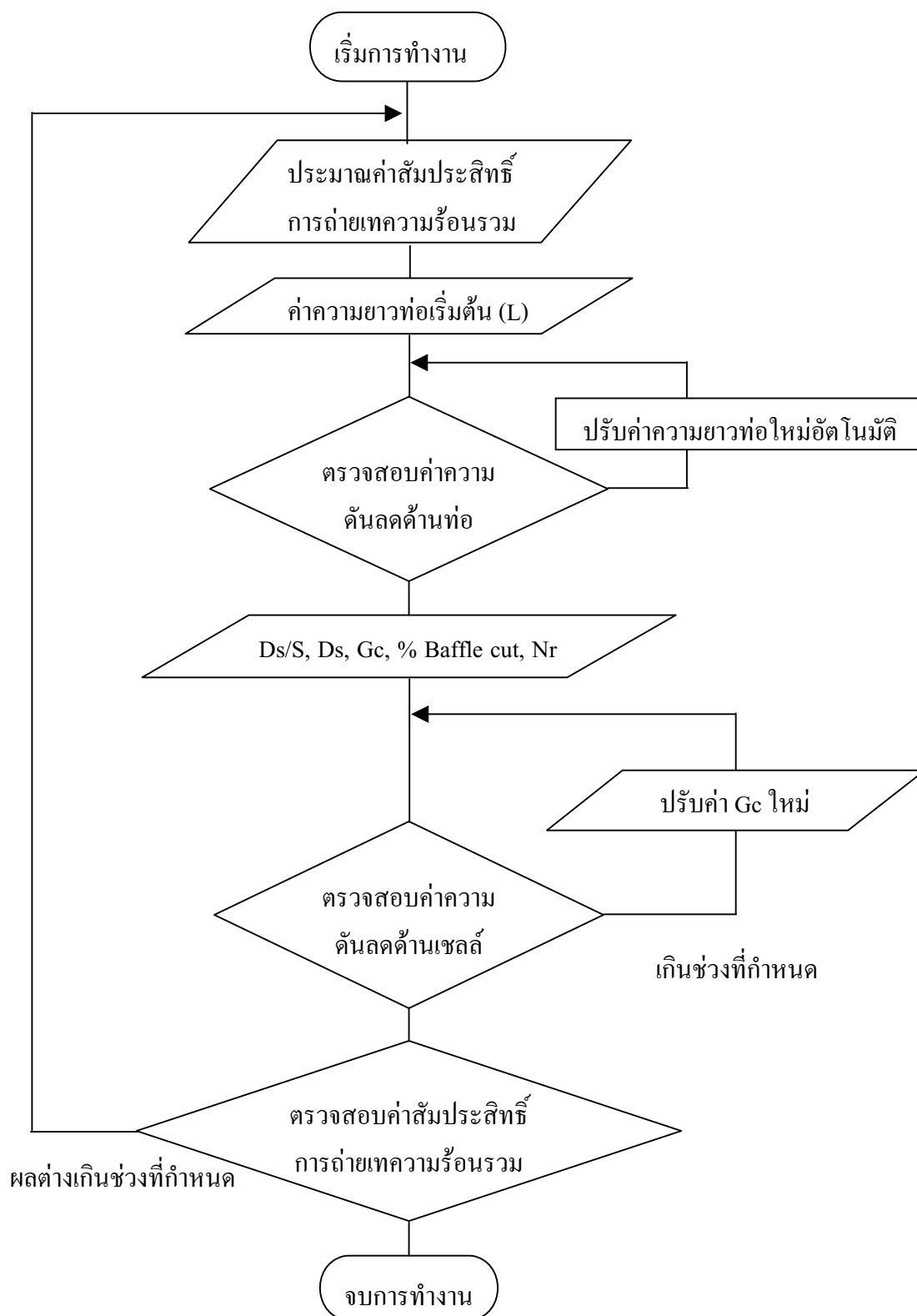
ภาพผนวกที่ ก6 หน้าจอแสดงการป้อนข้อมูลอัตราการไหล และสมบัติทางกายภาพของของไหล ด้าน เซลล์เมื่อคลิกที่ Shell ของหน้าจอหลัก

เมื่อโปรแกรมแสดงหน้าจอหลักให้คลิกที่ปุ่มเลือก Tube side เพื่อป้อนข้อมูลรายละเอียดด้านท่อ ซึ่งประกอบด้วย ค่าสมบัติทางกายภาพของของไหลในท่อ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นน้ำร้อน โดยจะใช้ข้อมูลเฉลี่ยระหว่างทางเข้ากับทางออกของของไหลด้านท่อมาพิจารณาสมบัติทางกายภาพของน้ำร้อน ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก4 ซึ่งประกอบด้วย ค่าความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ ความหนืด และความนำความร้อน ตามลำดับ สำหรับอัตราการไหลของน้ำร้อนได้จากการเก็บข้อมูลในระบบ Continuous Blow Down ของโรงงาน (ในภาพที่ 9) หลังจากป้อนข้อมูลด้านท่อลงในช่องรับข้อมูลในหน้าต่าง Tube ครบแล้ว (ในภาพผนวกที่ ก7) ให้คลิกที่ปุ่ม Calculate เพื่อกลับไปหน้าจอหลัก



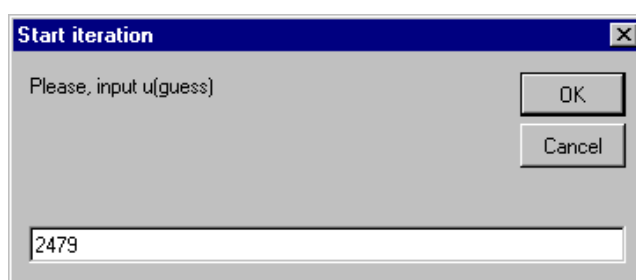
ภาพผนวกที่ ก7 หน้าจอแสดงการป้อนข้อมูลอัตราการไหล และสมบัติทางกายภาพของของไหล ด้านท่อ เมื่อคลิกที่ Tube ของหน้าจอหลัก

หลังจากป้อนข้อมูลในเมนูย่อย ซึ่งประกอบด้วย Condition, Pipe, Shell side และ Tube side ของหน้าจอหลักครบแล้ว หากผู้ใช้โปรแกรมต้องการแก้ไขข้อมูลให้คลิกที่ปุ่มคำสั่ง New Data เพื่อทำการป้อนข้อมูลใหม่ เมื่อป้อนข้อมูลครบถ้วนและถูกต้องแล้วให้คลิกที่ปุ่ม Calculate ของหน้าจอหลัก เพื่อเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมโดยมีลำดับการคำนวณดังแสดงในภาพผนวกที่ ก8



ภาพผนวกที่ ก8 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โปรแกรมจะเริ่มดำเนินการทำงานโดยแสดงกล่องข้อความ ดังภาพผนวกที่ ก9 เพื่อรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสำหรับใช้ในการคำนวณหาขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎี จากนั้นโปรแกรมจะทำการตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าประมาณกับค่าทางทฤษฎี หากมีความแตกต่างเกินช่วงที่กำหนด ($5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$) โปรแกรมจะวนกลับมารับการประมาณค่า เพื่อเริ่มต้นการคำนวณใหม่



ภาพผนวกที่ ก9 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

เมื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ลงในกล่องรับข้อความแล้วให้คลิกที่ปุ่ม OK เพื่อให้โปรแกรมรับค่าและเริ่มต้นการทำงาน โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณหาภาระความร้อน และค่าผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม จากข้อมูลเบื้องต้นที่ป้อนเข้าไปเพื่อนำค่าไปใช้ในการหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการ ซึ่งจากขั้นตอนนี้ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณ ดังภาพผนวกที่ ก10 ซึ่งประกอบด้วย ภาระความร้อน (Heat load) ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม (Log mean temperature difference) พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (Surface area require) พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อหนึ่งช่วงความยาวท่อ (Surface area per length) พื้นที่หน้าตัดท่อ (Cross section area) และค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($U(\text{guess})$) ที่รับเข้ามา จากนั้นคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Calculate เพื่อให้โปรแกรมทำงานขั้นตอนต่อไป

The screenshot shows a software window titled 'Heat Exchanger Design' with a sub-header 'Pre-Calculate Data'. It contains two main sections: 'Data' and 'U (guess)'. The 'Data' section lists five parameters with their values and units: Heat load (19385.7 Watt), Log mean temperature difference (21.4 °C), Surface area require (0.409 m²), Surface area per length (0.030 m²/m), and Cross-section area (3.89E-05 m²). The 'U (guess)' section shows a single parameter 'U (guess)' with a value of 2479 W/m²·K. A 'Calculate' button is located at the bottom of the window.

Parameter	Value	Unit
Heat load	19385.7	Watt
Log mean temperature difference	21.4	°C
Surface area require	0.409	m²
Surface area per length	0.030	m²/m
Cross-section area	3.89E-05	m²

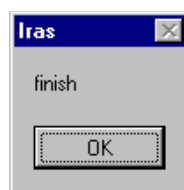
Parameter	Value	Unit
U (guess)	2479	W/m²·K

ภาพผนวกที่ ก10 หน้าจอแสดงผลของการคำนวณหาขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับการคำนวณในรายละเอียดด้านท่อ โปรแกรมจะเริ่มการทำงานโดยแสดงกล่องรับการประมาณค่าความยาวท่อต่อหนึ่งกลับเริ่มต้น ดังภาพผนวกที่ ก11 ให้ผู้ใช้ใส่ค่าลงในกล่องข้อความแล้วคลิกที่ปุ่ม OK เพื่อเริ่มต้นการคำนวณหาจำนวนท่อ อัตราการไหลต่อหนึ่งกลับ และค่าความดันลด จากนั้นโปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบค่าความดันลดที่คำนวณได้หากอยู่ในช่วงที่กำหนดในสภาวะการออกแบบ โปรแกรมจะแสดงกล่องข้อความ Finish ดังภาพผนวกที่ ก12 ให้คลิกที่ปุ่ม OK โปรแกรมก็จะทำงานขั้นต่อไป แต่ถ้าอยู่นอกช่วงโปรแกรมจะทำการเปลี่ยนค่าความยาวท่อต่อหนึ่งกลับให้โดยอัตโนมัติ คือความยาวใหม่เท่ากับความยาวเดิม ± 5 เซนติเมตร แล้วเริ่มการคำนวณใหม่จนกระทั่งได้ค่าความดันลดอยู่ในช่วงที่กำหนด ($0.07 - 0.35 \text{ kg/cm}^2$)

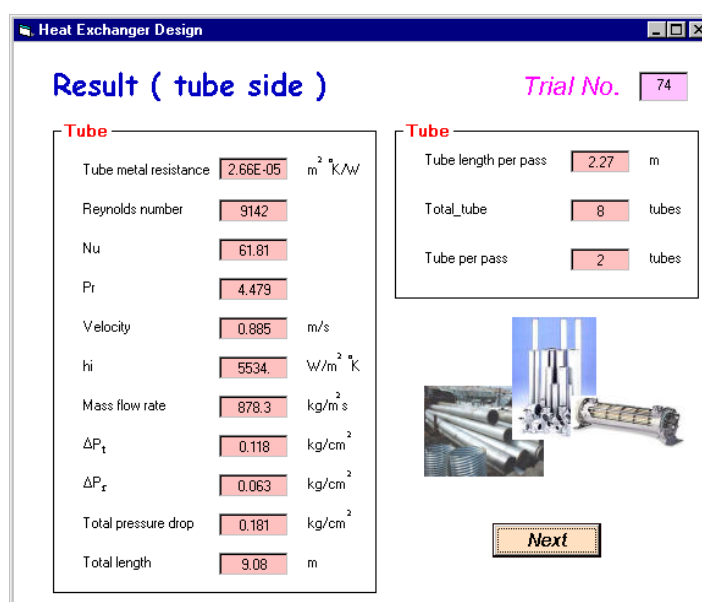
The screenshot shows a dialog box titled 'Start iteration'. It contains the text 'Please, input initial tube length per pass' and two buttons: 'OK' and 'Cancel'. There is a text input field at the bottom with the number '3' entered.

ภาพผนวกที่ ก11 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับการประมาณค่าความยาวท่อต่อหนึ่งกลับเริ่มต้น



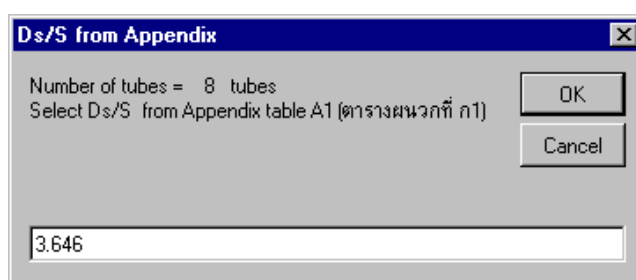
ภาพผนวกที่ ก12 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ Finish เมื่อค่าความดันลดด้านท่อที่คำนวณได้อยู่ในช่วงที่กำหนดในสถานะการออกแบบ

เมื่อผลการคำนวณด้านท่อที่มาจากการวนซ้ำตามเงื่อนไขจนเสร็จสมบูรณ์ โปรแกรมจะแสดงรายละเอียดในหน้าต่าง Result (tube side) ดังภาพผนวกที่ ก13 ซึ่งจะให้ค่าที่สำคัญเพื่อนำไปใช้ในการสร้างที่ประกอบด้วย ความยาวท่อต่อหนึ่งกลับ (Tube length per pass) จำนวนท่อรวม (Total tube) และจำนวนท่อต่อหนึ่งเที่ยวการไหล (Tube per pass) นอกจากนี้ยังแสดงผลการคำนวณต่าง ๆ ของด้านท่อ ได้แก่ ความต้านทานความร้อนของท่อ (Tube material resistance) เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) เลขนัสเซิลท์ (Nu) เลขแพรนด์ทอลล์ (Pr) ความเร็วการไหล (Velocity) อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Mass flow rate) ความดันลดในช่วงความยาวท่อ (ΔP_t) ความดันลดในช่วงกลับทิศการไหล (ΔP_r) ความดันลดรวม (Total pressure drop) และความยาวท่อรวม (Total tube length) จากนั้นให้ผู้ใช้ทำการคลิกปุ่ม Next เพื่อทำการคำนวณด้านเชลล์ต่อไป



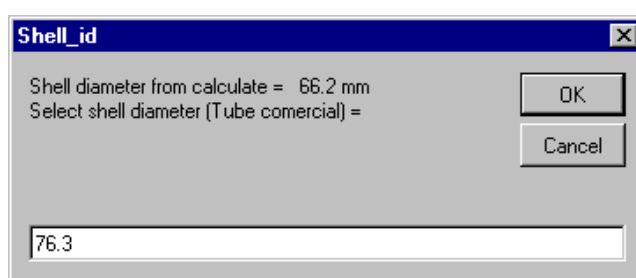
ภาพผนวกที่ ก13 หน้าจอแสดงผลการคำนวณด้านท่อ ซึ่งประกอบด้วย ความยาวท่อต่อหนึ่งกลับ จำนวนท่อ และรายละเอียดการคำนวณด้านท่อ

โปรแกรมจะเริ่มดำเนินการทำงานในส่วนการออกแบบด้านเซลล์ โดยนำข้อมูลจำนวนท่อแสดงในกล่องข้อความ เพื่อใช้ในการกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางเซลล์กับระยะห่างระหว่างท่อ (Ds/S) จากตารางผนวกที่ ก1 เมื่อทราบจำนวนท่อ สามารถหาค่า Ds/S ได้ จากนั้นนำค่าที่ได้ใส่ในช่องว่างดังภาพผนวกที่ ก14 แล้วคลิกที่ปุ่ม OK เพื่อรับค่า Ds/S สำหรับใช้ในการคำนวณด้านเซลล์



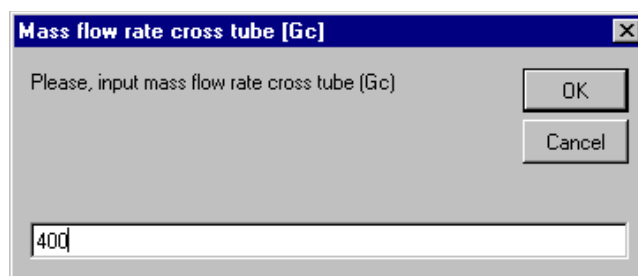
ภาพผนวกที่ ก14 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่า D/S จากตารางผนวกที่ ก1

โปรแกรมจะแสดงกล่องรับข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้กำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเซลล์ (จากตารางผนวกที่ ก2 และ ก3) ที่ใกล้เคียงและเหมาะสมกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ลงในกล่องรับข้อมูล เมื่อได้ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเซลล์ให้นำไปใส่ในช่องว่างดังภาพผนวกที่ ก15 จากนั้นคลิกที่ปุ่ม OK เพื่อทำงานขั้นต่อไป



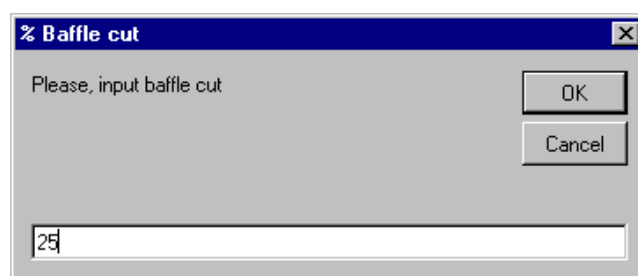
ภาพผนวกที่ ก15 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเซลล์

เมื่อโปรแกรมแสดงกล่องรับข้อมูลเพื่อรับการประมาณค่าอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในทิศตั้งฉากกับมัดท่อภายในเซลล์ (Gc) ดังภาพผนวกที่ ก16 ให้ผู้ใช้ใส่ค่า Gc ในช่องว่างและคลิกที่ปุ่ม OK เพื่อทำการรับค่าและแสดงกล่องรับข้อมูลเพื่อรับค่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่ส่วนตัดของแผ่นกั้นภายในเซลล์ต่อไป



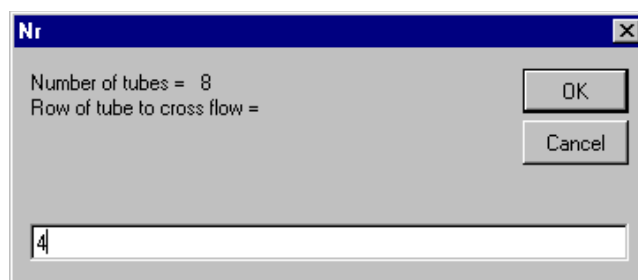
ภาพผนวกที่ ก16 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าอัตราการไหลด้านเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดสุทธิมัดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบนระนาบเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์

แผ่นกั้นภายในเซลล์สามารถช่วยในการเปลี่ยนทิศทางการไหลและทำหน้าที่เป็นแผ่นยึดมัดท่อ ซึ่งควรวางแผ่นกั้นทุกช่วงระยะห่าง 30 – 40 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (Walker, 1999) โดยแผ่นกั้นจะมีพื้นที่ส่วนเปิดของการไหล (Baffle cut) 20 – 25 เปอร์เซ็นต์ (วิวัฒน์, 2536) ซึ่งผู้ใช้จะต้องกำหนดค่าลงในช่องว่าง ดังภาพผนวกที่ ก17 และคลิกที่ปุ่ม OK เพื่อโปรแกรมจะได้รับค่า Baffle cut และทำงานในขั้นต่อไป



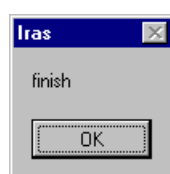
ภาพผนวกที่ ก17 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่ส่วนตัดของแผ่นกั้นภายในเซลล์

เมื่อโปรแกรมแสดงกล่องข้อความเพื่อรับค่าจำนวนแถวของท่อถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศการไหลภายในเซลล์ (Nr) ดังภาพผนวกที่ ก18 ให้ผู้ใช้ป้อนค่าจำนวนแถวของท่อโดยพิจารณาจากจำนวนท่อและการจัดวางท่อภายในเซลล์ (จากจำนวนท่อ 8 ท่อ และกำหนดลักษณะการไหลด้านเซลล์แบบ 2 เที้ยว ดังนั้นจึงมีค่าจำนวนแถวของท่อเท่ากับ 4 แถว) โดยมีลักษณะการจัดวางท่อแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral Triangular) ดังในภาพที่ 7 ซึ่งมีให้เลือกใช้ได้ 4 รูปแบบ (Configuration) จากนั้นทำการคลิกที่ปุ่ม OK เพื่อโปรแกรมจะได้คำนวณรายละเอียดด้านเซลล์ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก18 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าจำนวนแถวของท่อถ่ายเทความร้อนที่ตั้ง
ฉากกับทิศการไหลภายในเซลล์

โปรแกรมจะทำการประมวลผลจากข้อมูลค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในทิศตั้งฉากกับมัดท่อ และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ส่วนเปิดของแผ่นกั้น ซึ่งป้อนค่าลงในช่องรับข้อมูลในภาพผนวกที่ ก14 ถึง ก18 ตามลำดับ เพื่อทำการคำนวณและตรวจสอบค่าความดันลด หากมีค่านอกช่วงที่กำหนดในสถานะออกแบบ โปรแกรมจะแสดงกล่องรับข้อมูล สำหรับรับค่าอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในทิศตั้งฉากกับมัดท่อ (ในภาพผนวกที่ ก16) เพื่อเริ่มต้นการคำนวณด้านเซลล์ใหม่ แต่ถ้ามีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดในสถานะออกแบบ โปรแกรมจะแสดงกล่องข้อความ Finish ดังภาพผนวกที่ ก19 ให้ผู้ใช้คลิกที่ปุ่ม OK เพื่อให้โปรแกรมแสดงผลการคำนวณในหน้าต่าง Result (shell side) ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก19 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ Finish เมื่อค่าความดันลดด้านเซลล์ที่คำนวณได้อยู่
ในช่วงที่ กำหนดในสถานะการออกแบบ

ในหน้าต่างแสดงผลด้านเซลล์ (Result (shell side)) ดังภาพผนวกที่ ก20 โปรแกรมจะแสดงรายละเอียดผลการคำนวณด้านเซลล์ที่มาจากการวนซ้ำจนเสร็จสมบูรณ์ตามเงื่อนไข ซึ่งประกอบด้วย อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในทิศตั้งฉากกับมัดท่อและขนานมัดท่อ (Gb) เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) เลขแพรนด์ทล (Pr) เลขนัสเซลล์ท์ (Nu) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ (h_o) ความเร็วของการไหล (Velocity) ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น (Baffle space)

จำนวนช่องระหว่างแผ่นกั้น (Crossflow) ความดันลดตั้งฉากมัดท่อภายในเชลล์ ($\Delta P_c'$) ความดันลดขนานมัดท่อภายในเชลล์ ($\Delta P_b'$) และความดันลดรวมภายในเชลล์ (Total pressure drop) จากนั้นทำการคลิกที่ปุ่ม Next เพื่อโปรแกรมจะได้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมต่อไป

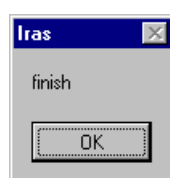
Result (shell side)			Trial No. 1
Shell			
Mass flow rate (Gb)	956.8	kg/m ³ s	 
Mass flow rate (Ge)	618.6	kg/m ³ s	
Reynolds no.	9581		
Pr	4.021		
Nu	75.95		
h _a	5095.5	W/m ² K	
Velocity	0.624	m/s	
Baffle space	10.5	cm	
Cross flow	21		
$\Delta P_c'$	3.03E-04	kg/cm ²	
$\Delta P_b'$	0.01	kg/cm ²	
Total pressure drop	0.5	kg/cm ²	
Shell			
Tube spacing	11.9	mm	
De/s	3.646		
Shell diameter	76.3	mm	
Mass flow rate (Gc)	400	kg/m ³ s	
% Baffle cut	25	%	

ภาพผนวกที่ ก20 หน้าจอแสดงผลของการคำนวณหาระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น จำนวนแผ่นกั้น และรายละเอียดการคำนวณด้านเชลล์

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และรายละเอียดต่าง ๆ สำหรับการเขียนแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามขนาดที่คำนวณ จะแสดงผลในหน้าจอ ดังภาพผนวกที่ ก21 ซึ่งโปรแกรมจะตรวจสอบค่าความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ประมาณกับที่คำนวณได้ หากมีค่าแตกต่างมากกว่าที่กำหนด ผู้ใช้สามารถบันทึกข้อมูลที่คำนวณได้โดยการคลิกปุ่มคำสั่ง Record เพื่อบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Access ซึ่งใช้เป็นฐานข้อมูล จากนั้นคลิกปุ่มคำสั่ง Trial again เพื่อย้อนกลับไปเริ่มต้นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใหม่ โดยให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณ (U (calculate)) กรณีค่าผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ประมาณกับที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดตามเงื่อนไข (คลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$) โปรแกรมจะแสดงกล่องข้อความ Finish ดังภาพผนวกที่ ก22 ให้ผู้ใช้คลิกที่ปุ่ม OK เพื่อแสดงความเสร็จสมบูรณ์ของการคำนวณขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยซึ่งไปตามเงื่อนไขทุกประการ สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการเขียนแบบ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น (Baffle space) ระยะพิทของ

ท่อ (Tube spacing) ความยาวท่อต่อหนึ่งกลับ (Tube length per pass) ความยาวท่อรวม (Total tube length) จำนวนช่องระหว่างแผ่นกั้นต่อหนึ่งเกี่ยวกับการไหลด้านเชลล์ (Crossflow per pass) จำนวนช่องระหว่างแผ่นกั้นทั้งหมด (Total crossflow) เกี่ยวกับการไหลด้านท่อ (Tube pass) เกี่ยวกับการไหลด้านเชลล์ (Shell pass) ความดันลดรวมด้านท่อ (Pressure drop (tube)) ความดันลดรวมด้านเชลล์ (Pressure drop (shell)) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ (h_i) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ (h_o) การต้านทานความร้อนของท่อ (Tube resistance) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในในเชลล์ (ds) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (di) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (do) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการประมาณค่า ($U(\text{guess})$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการคำนวณ ($U(\text{calculate})$) และค่าผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ประมาณกับที่คำนวณ ($U(\text{difference})$) จะต้องทำการบันทึกไว้ในฐานข้อมูลก่อน โดยการคลิกปุ่มคำสั่ง Record ในหน้าต่าง Data for design (ภาพผนวกที่ ก21) เพื่อบันทึกข้อมูล จากนั้นคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Economic เพื่อคำนวณค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับใช้ประกอบการตัดสินใจในการลงทุนโครงการ

ภาพผนวกที่ ก21 หน้าจอแสดงผลของการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม



ภาพผนวกที่ ก22 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ Finish เมื่อค่าผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ประมาณกับที่คำนวณได้มีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

จากหน้าจอหลักของโปรแกรมจะแสดงอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของของไหลด้านท่อ (Hot Water) อุณหภูมิทางเข้าและทางออกของของไหลด้านเซลล์ (Water Supply) อัตราการไหลด้านท่อและด้านเซลล์ และพลังงานความร้อน (Heat loss) ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังภาพผนวกที่ ก23 หากไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงข้อมูลดังกล่าว ให้ทำการคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Calculate เพื่อให้โปรแกรมใช้ค่าที่แสดงอยู่ไปคำนวณ พร้อมกับแสดงกรอบรูปภาพ Fuel Type (ในภาพผนวกที่ ก24) แต่ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงข้อมูล ให้ผู้ใช้คลิกที่ปุ่มคำสั่ง New data เพื่อลบข้อมูลในหน้าจอหลัก จากนั้นป้อนค่าต่าง ๆ ให้ครบถ้วนแล้ว จึงคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Calculate เพื่อให้โปรแกรมรับค่าที่ป้อนใหม่ โดยโปรแกรมจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหา Heat loss ซึ่งจะแสดงผลในหน้าจอหลักพร้อมกับกรอบรูปภาพ Fuel Type เพื่อรับการกำหนดประเภทเชื้อเพลิงสำหรับใช้คำนวณในลำดับต่อไป

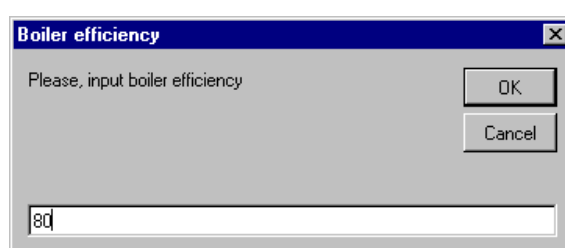
Temperature (C°)		Flow rate	
Temp. tube in	99.13	Flow rate in tube side	248.4 kg/hr
Temp. tube out	65.27	Flow rate in shell side	1168.2 kg/hr
Temp. shell in	28.00		
Temp. shell out	34.53		
Heat loss: 43462.1 kJ/hr		New Data Calculate Next	

ภาพผนวกที่ ก23 หน้าจอหลักของโปรแกรมการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

Temperature (C°)		Flow rate	
Temp. tube in	99.13	Flow rate in tube side	248.4 kg/hr
Temp. tube out	65.27	Flow rate in shell side	1168.2 kg/hr
Temp. shell in	28.00		
Temp. shell out	34.53		
Heat loss: 31880.2 kJ/hr		Click here -> Fuel Type	
		New Data Calculate Next	

ภาพผนวกที่ ก24 หน้าจอหลักแสดงค่าพลังงานความร้อน (Heat loss) ที่คำนวณได้ และกรอบรูปภาพ Fuel Type

ภายหลังจากผู้ใช้งานทำการคลิกที่กรอบรูปภาพ Fuel Type ในหน้าจอหลัก โปรแกรมจะแสดงกล่องรับค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่จะทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งได้จากการออกแบบนี้ (ได้จากข้อมูลของโรงงาน) ดังภาพผนวกที่ ก25 และแสดงกล่องรายการเพื่อให้กำหนดประเภทเชื้อเพลิง ดังภาพผนวกที่ ก26 จากนั้นโปรแกรมจะทำการตรวจสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจากตาราง Energy Content of Fuel ที่แสดงในหน้าจอนี้ เพื่อใช้ในการคำนวณพร้อมกับแสดงผลค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้ จากนั้นคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Back เพื่อย้อนกลับไปยังหน้าจอหลัก



ภาพผนวกที่ ก25 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ใช้ในระบบไอน้ำของโรงงาน

เชื้อเพลิง	หน่วยเชื้อเพลิง (Unit)	ค่าความร้อน (MJ/Unit)
Coal (Import)	kg	26.37
Lignite (Mae Moh)	kg	10.47
Coke	kg	27.63
Fuel wood	kg	15.99
Diesel	litre	36.42
Kerosene	litre	34.53
Gasoline	litre	31.48
Fuel oil	litre	39.77
LPG	litre	26.62
Natural gas	scf	1.04
Electricity	kWh	3.60

เลือกเชื้อเพลิง: Fuel oil

ค่าความร้อน: 39.77 MJ/kg

ประหยัดพลังงาน: 31.88 MJ

ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ: 80 %

ประหยัดเชื้อเพลิง: 2380.793 litres/year

Back

ภาพผนวกที่ ก26 หน้าจอแสดงตาราง Energy Content of Fuel และผลการคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้

เมื่อโปรแกรมย้อนกลับมายังหน้าจอหลัก ดังภาพผนวกที่ ก27 ให้คลิกที่กรอบรูปภาพ Price เพื่อกำหนดระยะเวลาโครงการในการใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งโปรแกรมจะทำการตรวจสอบราคาเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยจากรายราคาทางการเงิน (In Current Term) ดังภาพผนวกที่ ก28 จากนั้นเมื่อโปรแกรมแสดงผลราคาเชื้อเพลิงของแต่ละปีในช่วงเวลาที่กำหนดแล้ว ให้ผู้ใช้คลิกที่ปุ่ม Back เพื่อย้อนกลับมาสู่หน้าจอหลักอีกครั้ง

Heat Exchanger Design

Economic Analysis

Temperature (C°)

Temp. tube in: 99.13
Temp. tube out: 65.27
Temp. shell in: 28.00
Temp. shell out: 34.53

Flow rate

Flow rate in tube side: 248.4 kg/hr
Flow rate in shell side: 1168.2 kg/hr

Price (Click here)

Heat loss: 31880.2 kJ/hr

Buttons: New Data, Calculate, Next

ภาพผนวกที่ ก27 หน้าจอหลักแสดงกรอบรูปภาพ Price

Heat Exchanger Design

พหุกรณ์ราคาเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง: Fuel oil

เริ่มต้นโครงการ: 2546, สิ้นสุดโครงการ: 2551, ระยะเวลาโครงการ (ปี): 5

Back

ที่มา:

- ราคาจากมติ. ลงวันที่ 9 สิงหาคม 2545
- ราคาจากรายงาน Conversion of BPK#1-4 to Oilmulsion Friday by Power Tech Associates : April, 2002
- ราคาจากฝ่ายพัฒนาและแผนงาน

หมายเหตุ: ราคาเชื้อเพลิงทุกชนิดไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม อัตราแลกเปลี่ยน 43 บาท/เหรียญสหรัฐ

ปี (พ.ศ.)	Diesel (บาท/ลิตร)	Fuel oil (บาท/ลิตร)	Natural Gas (บาท/กก)	Coal (Import) (บาท/ตัน)	Lignite (Man Moh) (บาท/ตัน)
2546	12.54	7.72	152.68	1775.41	569.70
2547	10.84	5.92	145.74	1777.17	575.21
2548	9.85	7.25	144.79	1778.98	580.73
2549	9.85	5.28	143.48	1780.82	586.24
2550	10.00	5.57	143.59	1782.71	591.76
2551	10.07	5.62	147.35	1784.64	597.27
2552	10.14	5.68	146.32	1786.61	602.79
2553	10.20	5.73	146.61	1788.63	608.30
2554	10.34	5.84	148.08	1790.70	613.82
2555	10.47	5.95	149.68	1792.82	619.33
2556	10.60	6.06	152.39	1794.98	624.85
2557	10.74	6.17	155.55	1796.77	630.36
2558	10.87	6.28	157.90	1799.04	635.87
2559	11.01	6.39	156.68	1801.37	641.39

ปี (พ.ศ.): 2546, 2547, 2548, 2549, 2550

ราคา Fuel oil (บาท/ลิตร): 7.72, 5.92, 7.25, 5.28, 5.57

ภาพผนวกที่ ก28 หน้าจอแสดงตารางราคาทางการเงิน (In Current Term) และระยะเวลาโครงการในการใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อโปรแกรมปรากฏหน้าจอหลัก (ภาพผนวกที่ ก29) ภายหลังจากการกำหนดประเภทเชื้อเพลิงและระยะเวลาโครงการแล้ว ให้ผู้ใช้คลิกที่ปุ่มคำสั่ง Next เพื่อเข้าสู่หน้าจอการประเมินโครงการ โดยโปรแกรมจะแสดงกล่องรับค่าเงินลงทุนในโครงการ ดังภาพผนวกที่ ก30 ซึ่งเป็นการประมาณค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตลอดจนการติดตั้งให้พร้อมใช้งาน และกล่องรับค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรายปี ดังภาพผนวกที่ ก31

Heat Exchanger Design

Economic Analysis

Temperature (C°)

Temp. tube in	99.13
Temp. tube out	65.27
Temp. shell in	28.00
Temp. shell out	34.53

Flow rate

Flow rate in tube side	248.4 kg/hr
Flow rate in shell side	1168.2 kg/hr

Heat loss: 31880.2 kJ/hr

Buttons: New Data, Calculate, Next

ภาพผนวกที่ ก29 หน้าจอหลักภายหลังจากการกำหนดประเภทเชื้อเพลิง และระยะเวลาโครงการ

investment

Please, input machine and install cost

50000

Buttons: OK, Cancel

ภาพผนวกที่ ก30 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าเงินลงทุนในโครงการ

maintenance

Please, input maintenance cost

1470

Buttons: OK, Cancel

ภาพผนวกที่ ก31 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรายปี

ในภาพผนวกที่ ก32 โปรแกรมจะแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ที่ได้รับค่าและคำนวณไว้ก่อนหน้านี้แล้ว ซึ่งประกอบด้วย ระยะเวลาโครงการ พลังงานที่สามารถประหยัดได้ ปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้ และราคาเชื้อเพลิงในแต่ละปีของระยะเวลาโครงการ ซึ่งโปรแกรมจะนำไปใช้ในการคำนวณหามูลค่าเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้เพื่อใช้ในการประเมินโครงการด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้ 1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) 2. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) 3. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)

ภาพผนวกที่ ก32 หน้าจอแสดงรายละเอียดพลังงานในโครงการ สำหรับใช้ในการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อผู้ใช้คลิกที่ปุ่มคำสั่ง Calculate ในหน้าต่างคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ โปรแกรมจะแสดงกล่องรับค่าอัตราส่วนลด (Discount rate) ซึ่งมักใช้อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของธนาคารพาณิชย์ ดังภาพผนวกที่ ก33 ซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ และอัตราผลตอบแทนภายใน เมื่อป้อนค่าเสร็จแล้วให้ทำการคลิกที่ปุ่ม OK เพื่อให้โปรแกรมทำงานในขั้นต่อไป

ภาพผนวกที่ ก33 หน้าจอแสดงกล่องข้อความ เพื่อรับค่าอัตราส่วนลด (Discount rate)

โปรแกรมจะทำการคำนวณค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน ระยะเวลาคืนทุน และผลการวิเคราะห์ โดยแสดงผลดังภาพผนวกที่ ก34 เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานและต้องการออกจากโปรแกรมให้ผู้ใช้คลิกที่ปุ่มคำสั่ง Exit หากต้องการกลับไปเริ่มการทำงานใหม่ทั้งหมดให้คลิกที่ปุ่มคำสั่ง Go to main โปรแกรมจะย้อนกลับไปหน้าจอหลักของการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ในภาพผนวกที่ ก2) เพื่อเริ่มต้นการคำนวณใหม่ แต่ถ้าต้องการคำนวณเฉพาะในส่วนเศรษฐศาสตร์ ให้คลิกที่ปุ่มคำสั่ง Economic โปรแกรมจะแสดงหน้าจอ (ในภาพผนวกที่ ก23) เพื่อเริ่มต้นการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ใหม่

Heat Exchanger Design

เงินทุนในโครงการ: 50000 บาท

ระยะเวลาโครงการ: 5 ปี

ประยัตินังงาน: 31880.18 %

ประยัตินังเงิน: 2380.793 ลิตร

ประยัตินังเงินทั้งสิน: 63423.98 บาท

NPV: 7315.13

IRR: 6.65 %

PB: 2.72 ปี

จากผลการวิเคราะห์พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก แสดงว่าอัตราผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนในโครงการนี้สูงกว่าอัตราส่วนลด นอกจากนั้นอัตราผลตอบแทนภายในยังมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืมซึ่งถือว่ารายย่อยขึ้นดี ซึ่งแสดงว่ามีความเป็นไปได้ในการดำเนินโครงการ โดยมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 2.72 ปี

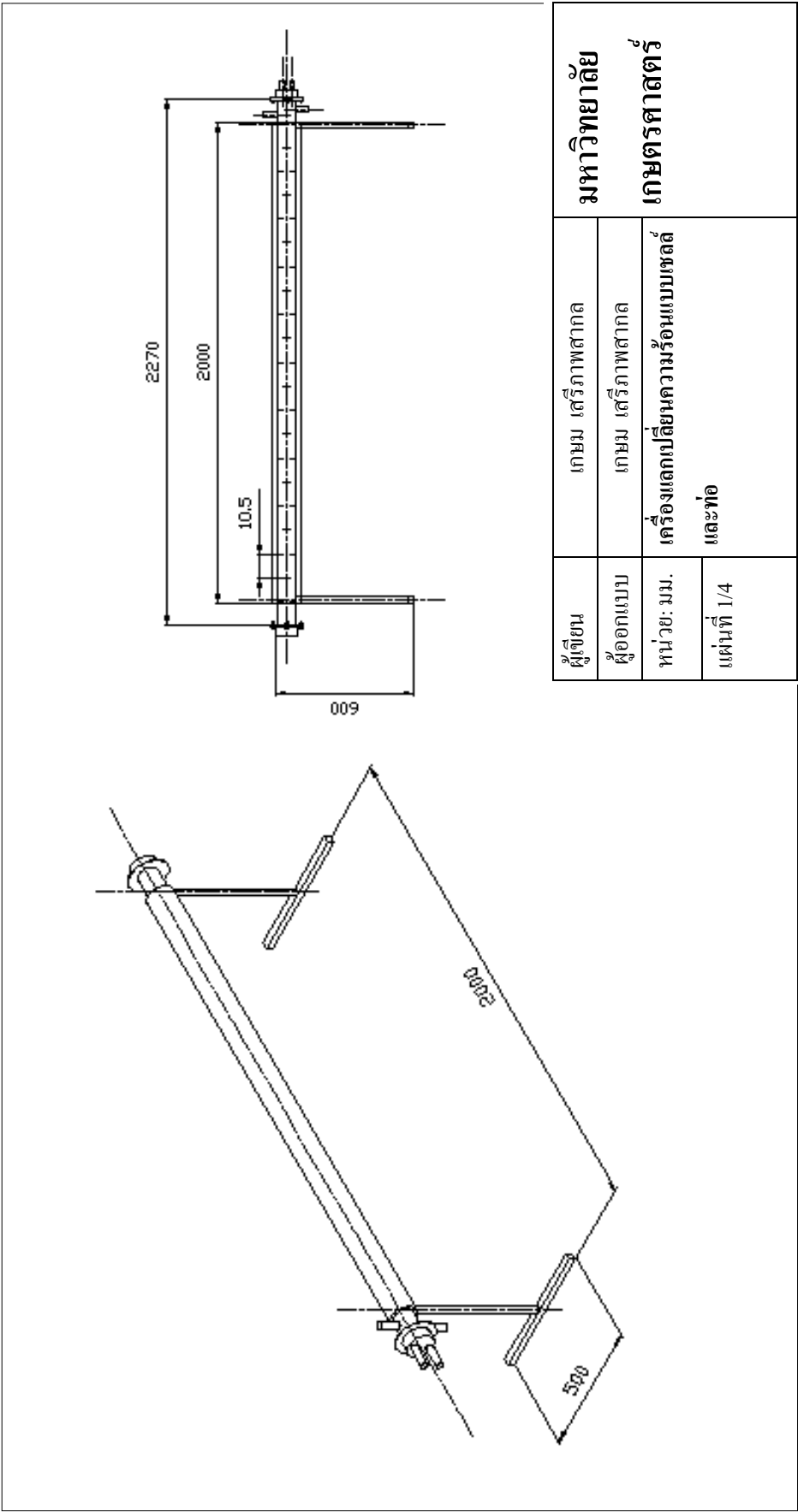
ปุ่ม: Calculate, Economic, Go to Main, Exit

ปี (พ.ศ.)	2546	2547	2548	2549	2550
ราคา Fuel oil (บาท/ลิตร)	7.72	5.92	7.25	5.28	5.57

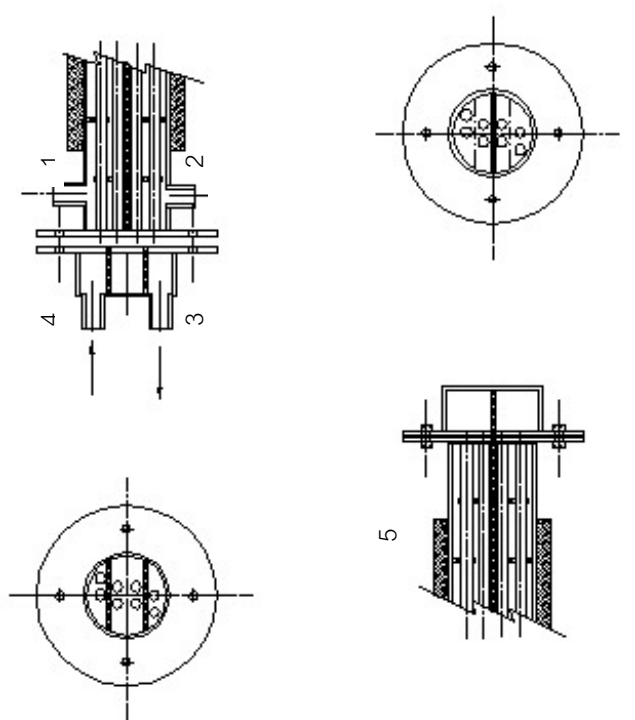
ภาพผนวกที่ ก34 หน้าจอแสดงผลการประเมินโครงการด้วยวิธี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน

ภาคผนวก ข

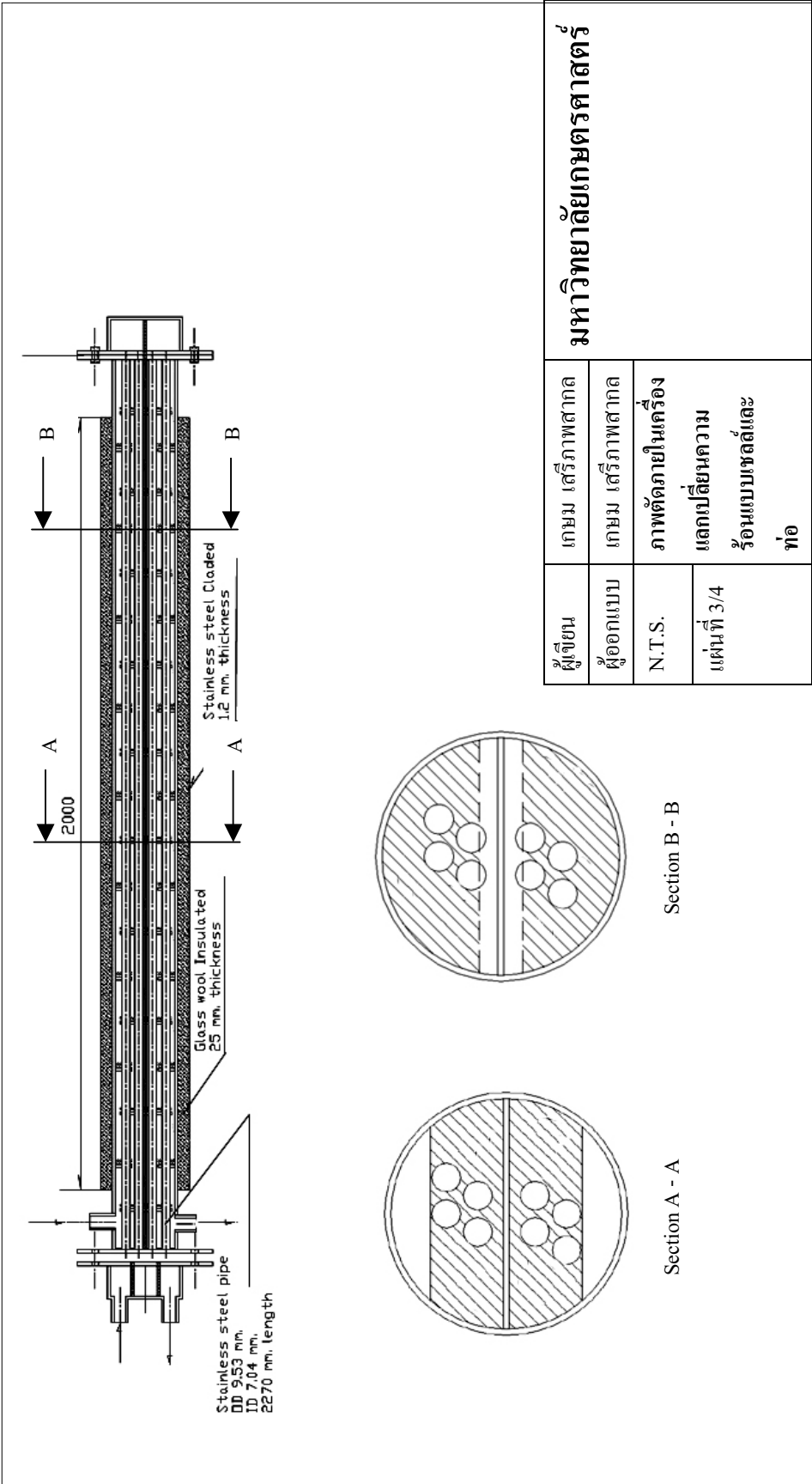
ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการทดสอบ



ภาพผนวกที่ ๑1 แบบแสดงขนาดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ

			
Items	Description	Material	
1	Water Supply Outlet	Stainless Steel Pipe Sch.40 φ 1/2"	
2	Water Supply Inlet	Stainless Steel Pipe Sch.40 φ 1/2"	
3	Hot Water Out	Stainless Steel Pipe Sch.40 φ 1/2"	
4	Hot Water In	Stainless Steel Pipe Sch.40 φ 1/2"	
5	Insulation	Fiberglass 1" thickness.	
ผู้เขียน	เกษม เกริกภาพสกล	มหาวิทยาลัย	
ผู้ออกแบบ	เกษม เกริกภาพสกล	เกษตรศาสตร์	
N.T.S.	ภาพตัดแสดงภายในเครื่องแลกเปลี่ยน		
แผ่นที่ 2/4	ความร้อนแบบแชลล์และท่อ		

ภาพผนวกที่ ๒2 แบบแสดงการแบ่งช่องทางการไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพผนวกที่ ข3 แบบแสดงภาพตัดภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพผนวกที่ ข5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพผนวกที่ ข6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ความดัน และอุณหภูมิ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพผนวกที่ ข7 การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ภาคผนวก ค

ข้อมูลประกอบการคำนวณ

ตารางผนวกที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนท่อ (n) กับค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลาง
เซลล์กับระยะห่างระหว่างท่อ (Ds/S) และลักษณะการจัดวางกลุ่มท่อ
(Configuration)

จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ ¹ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S) ²	จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S)
1	1	1.000	56	2	8.810
2	2	2.000	57	4	8.858
3	3	2.154	60	2	8.938
4	2	2.732	61	1	9.000
7	1	3.000	63	3	8.082
8	2	3.646	64	2	9.186
10	2	4.000	69	3	9.326
12	3	4.056	70	2	9.660
13	1	4.464	73	1	9.718
14	2	4.606	74	2	9.888
19	1	5.000	76	2	10.000
22	2	5.582	85	1	10.166
23	4	5.770	88	2	10.644
24	2	6.000	92	2	10.848
27	3	6.034	96	4	11.038
31	1	6.292	102	3	11.264
37	1	7.000	104	2	11.536
38	2	7.244	109	1	11.584
42	3	7.430	110	2	12.000
44	4	7.764	114	3	12.016
48	2	8.000	121	1	12.136
55	1	8.212	126	2	12.532

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S)	จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S)
129	3	12.718	206	2	15.934
130	2	12.790	208	2	16.000
131	4	12.906	211	1	16.100
133	4	12.948	212	2	16.132
135	4	13.032	213	3	16.144
136	2	13.124	217	4	16.256
139	1	13.166	219	3	16.275
141	3	13.220	220	2	16.524
151	1	13.490	225	3	16.534
154	2	14.000	230	2	16.716
156	3	14.012	235	1	16.874
158	2	14.076	241	1	17.000
163	1	14.114	246	3	17.290
168	3	14.316	253	1	17.370
170	2	14.528	254	2	17.644
174	3	14.614	258	2	17.704
176	4	14.812	262	2	17.822
178	2	14.892	264	2	18.000
187	1	15.000	270	3	18.010
188	4	15.344	274	4	18.198
190	4	15.414	276	3	18.244
199	1	15.422	283	1	18.436
202	2	15.798	284	2	18.578

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S)	จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S)
288	2	18.692	376	2	21.224
295	1	18.776	378	3	21.232
301	1	19.000	379	1	21.298
306	3	19.148	380	4	21.366
313	1	19.330	382	4	21.390
316	2	19.520	384	3	21.428
321	3	19.584	390	3	21.526
324	2	19.763	392	2	21.664
325	4	19.862	394	4	21.802
327	3	19.904	396	2	21.808
329	4	19.994	397	1	21.880
330	2	20.000	400	2	21.952
333	3	20.208	406	2	22.000
337	1	20.078	409	1	22.072
339	3	20.218	421	1	22.166
349	1	20.288	426	3	22.572
351	4	20.640	433	1	22.634
352	2	20.672	434	2	22.794
361	1	20.698	437	4	22.858
362	4	20.944	442	2	22.932
364	2	20.974	447	3	23.030
367	1	21.000	450	2	23.114
372	2	21.074	453	3	23.120

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S)	จำนวนท่อ (n)	ลักษณะการวาง กลุ่มท่อ (Configuration)	ค่าอัตราส่วน ระหว่างเส้นผ่า ศูนย์กลางเซลล์ กับระยะห่าง ระหว่างท่อ (Ds/S)
455	4	23.288	514	2	24.644
459	3	23.300	518	2	24.842
461	4	23.422	520	4	24.848
463	4	23.466	522	3	24.860
165	3	23.480	524	4	24.974
468	2	23.606	526	4	25.016
472	2	23.650	528	3	25.028
475	1	23.716	530	2	25.062
476	2	23.870	534	3	25.110
480	2	23.914	540	3	25.194
482	2	24.000	547	1	25.332
483	4	24.060	550	2	25.556
499	1	24.066	559	1	25.576
504	3	24.438	562	2	25.880
506	2	24.516	564	4	25.934
511	1	25.580			

¹ ลักษณะการจัดวางกลุ่มท่อ (Configuration) ในภาพที่ 7

² Ds = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเซลล์, S = ระยะห่างระหว่างท่อ

ที่มา: Fraas (1989)

ตารางผนวกที่ ค2 ขนาดมาตรฐานของ ท่อความดัน (STPG) ท่อความดันสูง (STS) ท่ออุณหภูมิสูง (STPT) ท่อเหล็กกล้าคาร์บอน (STPA) ท่ออุณหภูมิต่ำ (STPL)

ขนาดท่อ			Sch 10		Sch 20		Sch 30		Sch 40	
(นิ้ว)	(มม.)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก	ความหนา	น้ำหนัก
			(มม.)	(กก./ม.)	(มม.)	(กก./ม.)	(มม.)	(กก./ม.)	(มม.)	(กก./ม.)
1/8	6	10.5							1.7	0.369
1/4	8	13.8							2.2	0.629
3/8	10	17.3							2.3	0.851
1/2	15	21.7							2.8	1.31
3/4	20	27.2							2.9	1.74
1	25	34.0							3.4	2.57
1 1/4	32	42.7							3.6	3.47
1 1/2	40	48.6							3.7	4.10
2	50	60.5			3.2	4.52			3.9	5.44
2 1/2	65	76.3			4.5	7.97			5.2	9.12
3	80	89.1			4.5	9.39			5.5	11.3
3 1/2	90	101.6			4.5	10.8			5.7	13.5
4	100	114.3			4.9	13.2			6.6	16.0
5	125	139.8			5.1	16.9			6.6	21.7
6	150	165.2			5.5	21.7			7.1	27.7
8	200	216.3			6.4	33.1	7.0	36.1	8.2	42.1
10	250	267.4			6.4	41.2	7.8	49.9	9.3	59.2
12	300	318.5			6.4	49.3	8.4	64.2	10.3	78.3
14	350	355.6	6.4	55.1	7.9	67.7	9.5	81.1	11.1	94.3
16	400	406.4	6.4	63.1	7.9	77.6	9.5	93	12.7	12
18	450	457.2	6.4	71.1	7.9	87.5	11.1	122	14.3	15
20	500	508.0	6.4	79.2	9.5	117.	12.7	155	15.1	18

ที่มา: ธีระศักดิ์ (2526)

ตารางผนวกที่ ๓ ขนาดมาตรฐานของท่อสแตนเลส (SUS-TP, HTP, LTP, STP, JTP)

ขนาดท่อ (นิ้ว)	เส้นผ่า ศูนย์กลาง (มม.)	เส้นผ่า ภายนอก (มม.)	Sch 5S		Sch 10S		Sch 20S		Sch 40	
			ความ หนา	น้ำหนัก	ความ หนา	น้ำหนัก	ความ หนา	น้ำหนัก	ความ หนา	น้ำหนัก
			(มม.)	(กก./ม.)	(มม.)	(กก./ม.)	(มม.)	(กก./ม.)	(มม.)	(กก./ม.)
1/8	6	10.5	1.0	0.234	1.2	0.275	1.5	0.333	1.7	0.369
1/4	8	13.8	1.2	0.373		0.494	2.0	0.582	2.2	0.629
3/8	10	17.3	1.2	0.476		0.637	2.0	0.755	2.3	0.851
1/2	15	21.7	1.65	0.816	2.1	1.02	2.5	1.18	2.8	1.31
3/4	20	27.2	1.65	1.04	2.1	1.30	2.5	1.52	2.9	1.74
1	25	34.0	1.65	1.32	2.8	2.15	3.0	2.29	3.4	2.57
1 1/4	32	42.7	1.65	1.67	2.8	2.76	3.0	2.94	3.6	3.47
1 1/2	40	48.6	1.65	1.91	2.8	3.16	3.0	3.37	3.7	4.10
2	50	60.5	1.65	2.39	2.8	3.98	3.5	4.29	3.9	5.44
2 1/2	65	76.3	2.1	3.84	3.0	5.42	3.5	6.28	5.2	9.12
3	80	89.1	2.1	4.51	3.0	6.37	4.0	8.39	5.5	11.3
3 1/2	90	101.6	2.1	5.15	3.0	7.29	4.0	9.63	5.7	13.5
4	100	114.3	2.1	5.81	3.0	8.23	4.0	10.9	6.6	16.0
5	125	139.8	2.8	9.46	3.4	11.	5.0	16.6	6.6	21.7
6	150	165.2	2.8	11.2	3.4	13.6	5.0	19.8	7.1	27.7
8	200	216.3	2.8	14.7	4.0	20.9	6.5	33.6	8.2	42.1
10	250	267.4	3.4	22.1	4.0	26.0	6.5	41.8	9.3	59.2
12	300	318.5	4.0	31.0	4.5	34.8	6.5	50.0	10.3	78.3
14	350	355.6							11.1	94.3
16	400	406.4							12.7	12
18	450	457.2							14.3	15
20	500	508.0							15.1	18

ที่มา: ธีระศักดิ์ (2526)

ตารางผนวกที่ ๓4 สมบัติทางกายภาพของน้ำ ณ ความดันบรรยากาศ

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg °K)	การนำความร้อน (W/m °K)	ความหนืด (x 10 ⁶ Pa. s)
0	999.9	4.226	0.558	1793.636
5	1000.0	4.206	0.568	1534.741
10	999.7	4.195	0.577	1296.439
15	999.1	4.187	0.587	1135.610
20	998.2	4.182	0.597	993.414
25	997.1	4.178	0.606	880.637
30	995.7	4.176	0.615	792.377
35	994.1	4.175	0.624	719.808
40	992.2	4.175	0.633	658.026
45	990.2	4.176	0.640	605.070
50	988.1	4.178	0.647	555.056
55	985.7	4.179	0.652	509.946
60	983.2	4.181	0.658	471.650
65	980.6	4.184	0.663	435.415
70	977.8	4.187	0.668	404.034
75	974.9	4.190	0.671	376.575
80	971.8	4.194	0.673	352.059
85	968.7	4.198	0.676	328.523
90	965.3	4.202	0.678	308.909
95	961.9	4.206	0.680	292.238
100	958.4	4.211	0.682	277.528

ที่มา: Raznevic (1989)

ตารางผนวกที่ ๕ สมบัติทางกายภาพของโลหะ

Material	Thermal Conductivity (W/m °C)	Density (g/cm ³)	Yield Point (MPa)
Aluminum	232.0	2.7	90
Copper	389.5	8.9	310
Brass	103.9	8.5	414
Low Carbon Steel	48.5	7.9	269
Stainless Steel	17.3	8.0	234

ที่มา: Fraas (1989)

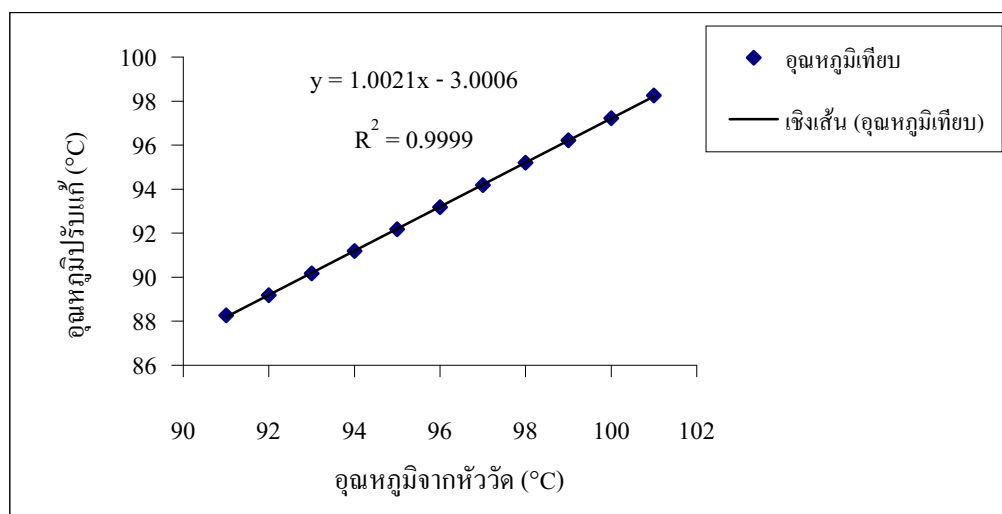
ตารางผนวกที่ ๖ สมบัติทางกายภาพของไอน้ำอิ่มตัว

อุณหภูมิ (°C)	เ็นธลปี (kJ/kg)		ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)	
	ของเหลว (h_f)	ไอน้ำอิ่มตัว (h_g)	ของเหลว (v_f)	ไอน้ำอิ่มตัว (v_g)
27	113.25	2550.8	0.0010035	38.774
30	125.79	2556.3	0.0010043	32.894
33	138.33	2561.7	0.0010053	28.011
36	150.86	2567.1	0.0010063	23.940
40	167.57	2574.3	0.0010078	19.523
45	188.45	2583.2	0.0010099	15.258
50	209.33	2592.1	0.0010121	12.032
55	230.23	2600.9	0.0010146	9.568
60	251.13	2609.6	0.0010172	7.671
65	272.06	2618.3	0.0010199	6.197
70	292.98	2626.8	0.0010228	5.042
75	313.93	2635.3	0.0010259	4.131
80	334.91	2643.7	0.0010291	3.407
85	355.90	2651.9	0.0010325	2.828
90	376.92	2660.1	0.0010360	2.361
95	397.96	2668.1	0.0010397	1.9819
100	419.04	2676.1	0.0010435	1.6729
105	440.15	2683.8	0.0010475	1.4194
110	461.30	2691.5	0.0010516	1.2102
115	482.48	2699.0	0.0010559	1.0366
120	503.71	2706.3	0.0010603	0.8919
125	524.99	2713.5	0.0010649	0.7706
130	546.31	2720.5	0.0010697	0.6685
135	567.69	2727.3	0.0010746	0.5822
140	589.13	2733.9	0.0010797	0.5089

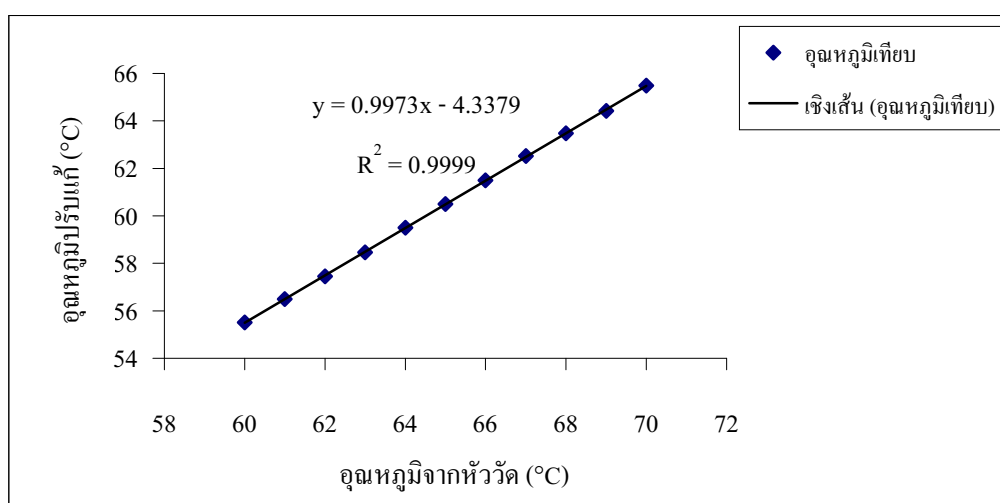
ที่มา: Singh and Heldman (1993)

ภาคผนวก ง

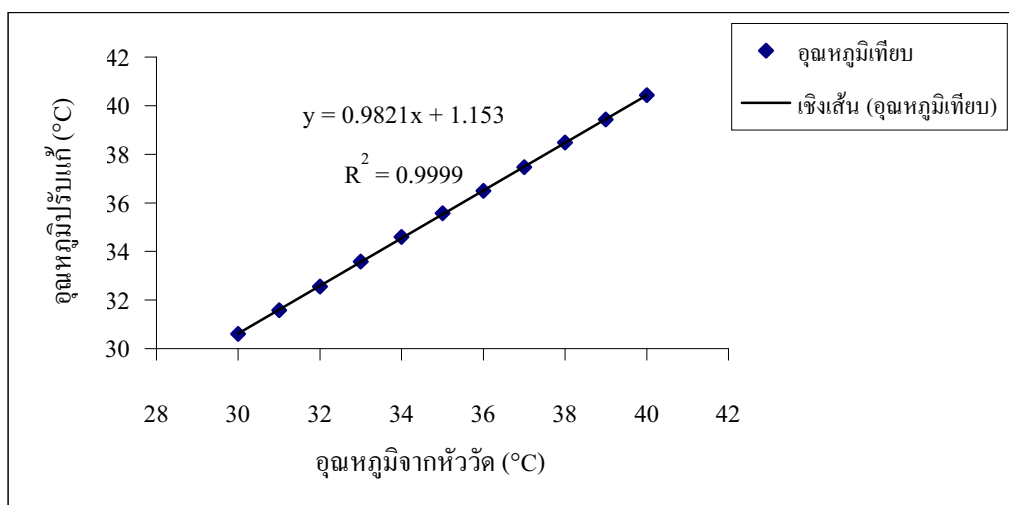
ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด



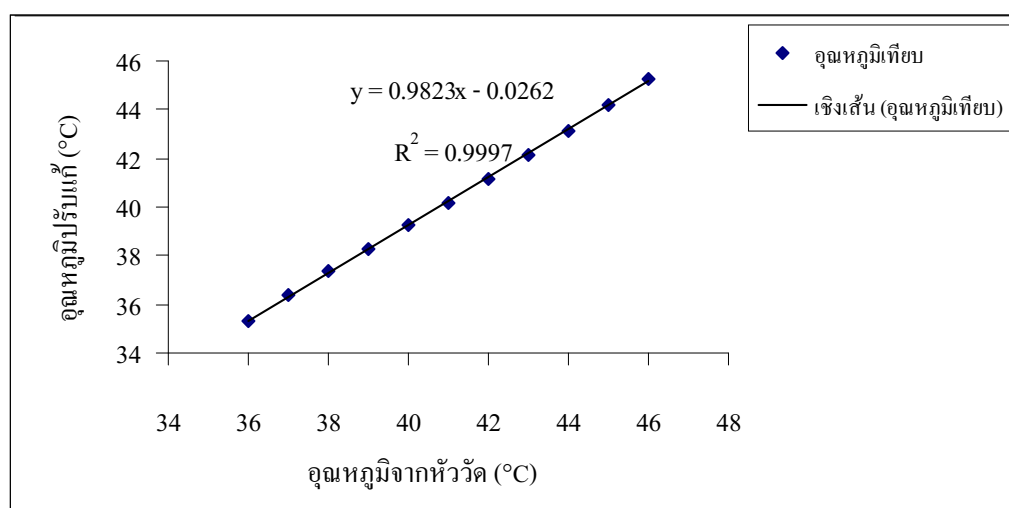
ภาพผนวกที่ ง1 การสอบเทียบเครื่องวัดและหัววัดอุณหภูมิ สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำร้อนด้านทางเข้า



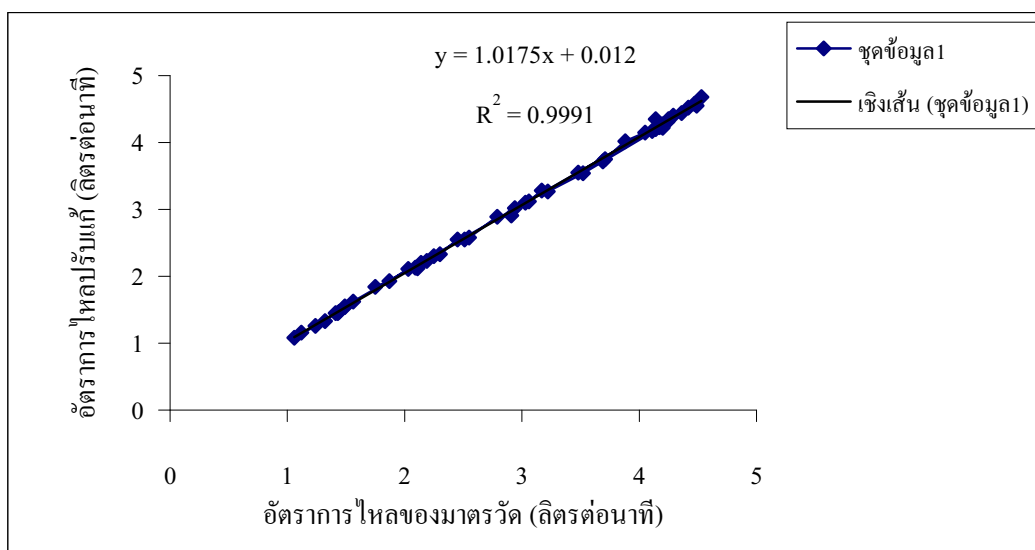
ภาพผนวกที่ ง2 การสอบเทียบเครื่องวัดและหัววัดอุณหภูมิ สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำร้อนด้านทางออก



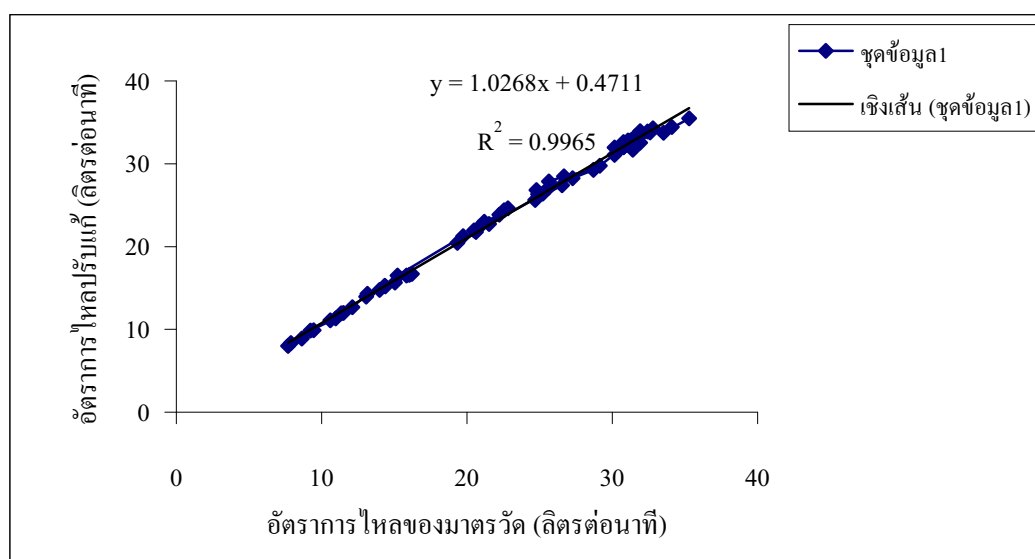
ภาพผนวกที่ 3 การสอบเทียบเครื่องวัดและหัววัดอุณหภูมิ สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเย็นด้านทางเข้า



ภาพผนวกที่ 4 การสอบเทียบเครื่องวัดและหัววัดอุณหภูมิ สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเย็นด้านทางออก



ภาพผนวกที่ 5 การสอบเทียบมาตรวัดอัตราการไหล สำหรับวัดอัตราการไหลด้านน้ำร้อน



ภาพผนวกที่ 6 การสอบเทียบมาตรวัดอัตราการไหล สำหรับวัดอัตราการไหลด้านน้ำเย็น

ภาคผนวก จ

การทดสอบโปรแกรม

การเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิจัยนี้ ได้ค้นคว้าสมการและวิธีการคำนวณจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ ประกอบกัน ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยการเปรียบเทียบกับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผู้ศึกษาและออกแบบไว้แล้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกกรณีศึกษาของ Fraas (1989) เป็นตัวตรวจสอบ โดยมีอุณหภูมิทางเข้าด้านเซลล์ 65.6 °C อุณหภูมิทางออกด้านเซลล์ 60 °C อุณหภูมิทางเข้าด้านท่อ 32.2 °C และอุณหภูมิทางออกด้านท่อ 37.8 °C อัตราการไหลด้านเซลล์และท่อเท่ากับ 18.2 และ 9.1 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการสอบเทียบ ดังตารางผนวกที่ จ1

ตารางผนวกที่ จ1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างค่าจากตัวอย่างกับค่าที่ได้จากโปรแกรม

รายละเอียดการคำนวณ	ค่าจากตัวอย่าง	ค่าจากโปรแกรม	หน่วย
1. รายละเอียดด้านท่อ			
ภาระความร้อน	211	214	กิโลวัตต์
ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม	27.8	27.8	องศาเซลเซียส
เลขเรย์โนลด์	49400	42559	-
เลขแพรนด์ทอลล์	5.1	5.1	-
อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	2220	1934.5	กก./ตร.ม. วินาที
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ			
ความดันลด	0.32	0.35	กก./ตร.ชม.
จำนวนเที่ยวการไหล	2	2	เที่ยว
จำนวนท่อ	38	44	ท่อ
ความยาวท่อต่อเที่ยวการไหล	4.56	3.69	ม.
ความยาวท่อรวม	173.28	162.36	ม.

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

รายละเอียดการคำนวณ	ค่าจากตัวอย่าง	ค่าจากโปรแกรม	หน่วย
2. รายละเอียดด้านเซลล์			
เลขเรย์โนลด์	1800	1540	-
เลขแฟรนค์ทอลล์	4.18	4.18	-
อัตราการใช้ไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	2420	2512	กก./ตร.ม. วินาที
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ			
จำนวนเที่ยวการใช้ไฟ	1	1	เที่ยว
ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน	248	387	มม.
ระยะพิทของท่อ	23.8	23.8	มม.
จำนวนช่องกัน	19	9	ช่อง
3. สัมประสิทธิ์การถ่ายเท			
ความร้อนรวม	880	870	วัตต์/ตร.ม. เซลเซียส

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณจากตัวอย่างกับผลการคำนวณจากโปรแกรม พบว่าค่า เลขเรย์โนลด์ เลขแฟรนค์ทอลล์ อัตราการใช้ไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ความดันลด และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ มีความแตกต่างกันน้อยมาก ส่วนค่าความยาวท่อต่อเที่ยวการใช้ไฟที่แตกต่างกัน เนื่องจากจำนวนท่อที่ไม่เท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาจากความยาวท่อรวมจะพบว่าไม่แตกต่างกันมาก