

บทที่ 4

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย โดยงานวิจัยครั้งนี้แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่สนใจนำมาศึกษา ส่วนที่ 2 เป็นการพัฒนาแบบจำลองของการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการกลั่นแยกเบื่องต้น (Flash Vessel) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

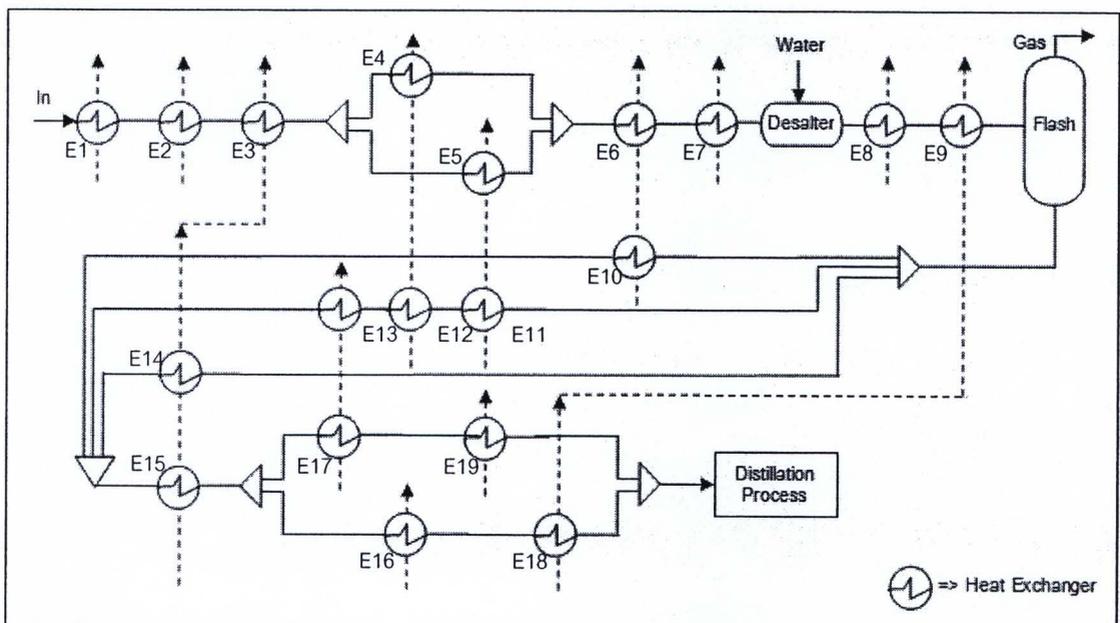
4.1 การศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาทำการวิจัยนั้น เบื่องต้นจะต้องเริ่มศึกษาผลของการเกิดฟาวลิงต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการการเกิดฟาวลิง (Fouling growth model) ตามที่ได้ศึกษาในงานวิจัยของ Anwar K. และคณะ (2000) ซึ่งมีรูปแบบการเกิดฟาวลิงทั้งหมด 4 รูปแบบสมการ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบหรือสายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อมูลโรงงานจริงมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ หรือสายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองตามสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ทั้งนี้จากการศึกษาจะทำให้สามารถเทียบเคียงและสามารถทำนายรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงได้ว่ารูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงรูปแบบสมการใด มีความเหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจากสมการอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ หรือสายผลิตภัณฑ์นั้นจะแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าการเกิดฟาวลิงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยศึกษาที่ระยะเวลาขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน

4.1.1 ศึกษาขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheats train) มีการขั้นตอนการดำเนินงานโดยเริ่มจากการรับน้ำมันดิบ (Crude oil) ซึ่งน้ำมันดิบจะถูกเก็บไปตรวจคุณภาพทางด้านกายภาพ และเคมี ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อเป็นการอุ่นให้ความร้อนกับน้ำมันให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ซึ่งจะใช้สำหรับการกลั่นตามข้อกำหนดการดำเนินการที่

กระบวนการได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้ในระบบช่วยงานเครื่องแลกเปลี่ยนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษาประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่องต่อเนื่องกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 น้ำมันดิบถูกลำเลียงมาตามท่อเพื่อเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ซึ่งน้ำมันดิบจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่กลั่นได้จากหอกถัน (เส้นประ) ต่อด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2, E3, E4, E5, E6, E7 ตามลำดับก่อนที่จะถูกส่งเข้าไปในกระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) เป็นกระบวนการที่ใช้น้ำละลายเกลือในน้ำมันดิบ เพื่อแยกน้ำซึ่งจะละลายเกลือออกจากกันป้องกันไม่ให้เกลือแร่หลุดออกไปทำปฏิกิริยากลายเป็นกรด ทำให้เกิดการกัดกร่อนกับระบบซึ่งเป็นโลหะ ต่อมาน้ำมันดิบที่ผ่านการกำจัดเกลือจะถูกส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8, E9 แล้วส่งผ่านไปยังกระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash Vessel) ด้วยการลดความดัน ซึ่งในหอนี้บางส่วนจะระเหยออกไปเมื่อความดันลดลง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแยก (Separation) ป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนหรือจับตัวเป็นผลึก หลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าว น้ำมันดิบจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10, E11, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E18 และ E19 ตามลำดับ เพื่อให้ได้น้ำมันดิบที่มีคุณสมบัติและอุณหภูมิตามต้องการ ก่อนที่น้ำมันดิบผลิตภัณฑ์จะถูกส่งเข้าสู่หอกถัน (Distillation) ต่อไป



รูปที่ 4.1 แผนภาพช่วยงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

4.1.2 รวบรวมข้อมูลจากโรงงานจริง

การศึกษาข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ใช้ข้อมูลค่าคงที่ของตัวแปรต่าง ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 – 4.19 เป็นค่าสภาวะการดำเนินการจริงที่โรงงานได้ออกแบบไว้ใช้สำหรับระบบข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ F คืออัตราการไหล, C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ, A คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน, U_c คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เริ่มต้นดำเนินการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและ $R_{f(c)}$ พาวลิงแฟกเตอร์หรือค่าความต้านทานของพาวลิง ที่ซึ่งมีตัวห้อย c และ h เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงสายเย็น (c) และสายร้อน (h)

ตารางที่ 4.1 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|------------|
| F_h | 243 | kg/s |
| F_c | 232 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.47 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 1.99 | kJ/kg K |
| A | 440 | m^2 |
| U_c | 0.73 | $kW/m^2 K$ |
| $R_{f,c}$ | 0.000944 | $m^2 K/kW$ |

ตารางที่ 4.2 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|------------|
| F_h | 82 | kg/s |
| F_c | 232 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.51 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.09 | kJ/kg K |
| A | 228 | m^2 |
| U_c | 0.77 | $kW/m^2 K$ |
| $R_{f,c}$ | 0.000951 | $m^2 K/kW$ |

ตารางที่ 4.3 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 44 | kg/s |
| F_c | 232 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.48 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.21 | kJ/kg K |
| A | 321 | m ² |
| U_c | 0.44 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.001413 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.4 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 17.36 | kg/s |
| F_c | 69.62 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.61 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.26 | kJ/kg K |
| A | 70 | m ² |
| U_c | 0.92 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.000958 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.5 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 41.54 | kg/s |
| F_c | 162.33 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.7 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.31 | kJ/kg K |
| A | 146 | m ² |
| U_c | 0.79 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.000988 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.6 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 92.04 | kg/s |
| F_c | 232 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.66 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.4 | kJ/kg K |
| A | 311 | m ² |
| U_c | 0.83 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.000969 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.7 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 27.78 | kg/s |
| F_c | 232 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.69 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.48 | kJ/kg K |
| A | 244 | m ² |
| U_c | 0.8 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.001059 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.8 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|---------|---------------------|
| F_h | 131.88 | kg/s |
| F_c | 230.31 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.65 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.53 | kJ/kg K |
| A | 441 | m ² |
| U_c | 0.73 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.00113 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.9 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 50.68 | kg/s |
| F_c | 230.41 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.51 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.62 | kJ/kg K |
| A | 940 | m ² |
| U_c | 0.28 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.002564 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.10 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 92.04 | kg/s |
| F_c | 66.75 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.84 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.7 | kJ/kg K |
| A | 600 | m ² |
| U_c | 0.77 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.001006 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.11 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 41.54 | kg/s |
| F_c | 50.46 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.87 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.67 | kJ/kg K |
| A | 183 | m ² |
| U_c | 0.76 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.001001 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.12 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 17.36 | kg/s |
| F_c | 50.46 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.85 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.75 | kJ/kg K |
| A | 162 | m ² |
| U_c | 0.83 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.000992 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.13 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 9.64 | kg/s |
| F_c | 50.46 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.72 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.77 | kJ/kg K |
| A | 147 | m ² |
| U_c | 0.39 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.002212 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.14 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|---------|---------------------|
| F_h | 136.16 | kg/s |
| F_c | 102.84 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.75 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.69 | kJ/kg K |
| A | 1509 | m ² |
| U_c | 0.45 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.00134 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.15 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 136.16 | kg/s |
| F_c | 220.03 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.87 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.84 | kJ/kg K |
| A | 1374 | m ² |
| U_c | 0.58 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.001315 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.16 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 16.2 | kg/s |
| F_c | 142.94 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.91 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.89 | kJ/kg K |
| A | 125 | m ² |
| U_c | 0.67 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.001185 | m ² K/kW |

ตารางที่ 4.17 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 9.64 | kg/s |
| F_c | 77.09 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.86 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.89 | kJ/kg K |
| A | 98.2 | m ² |
| U_c | 0.54 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.002011 | m ² K/kW |

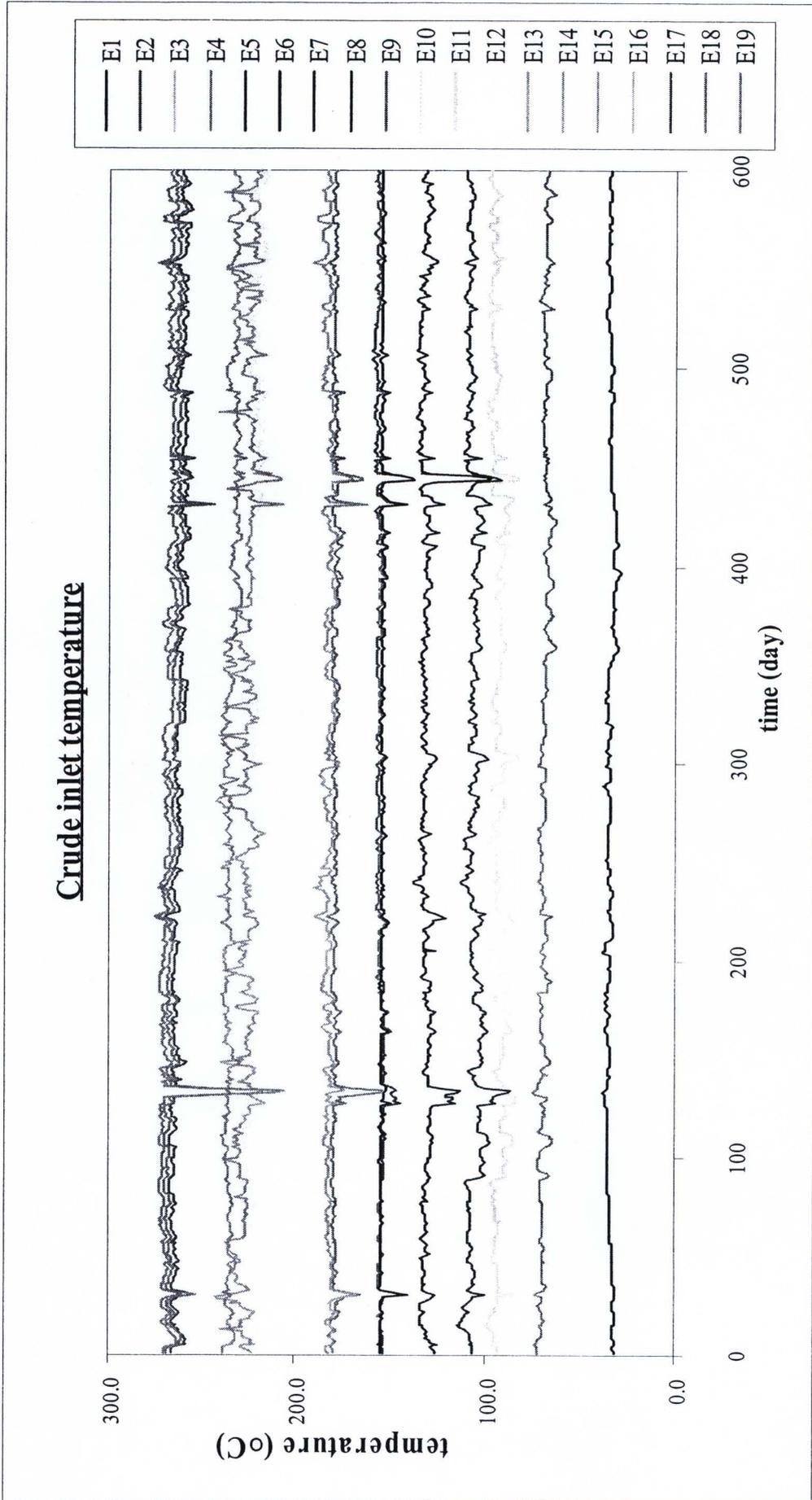
ตารางที่ 4.18 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 52.42 | kg/s |
| F_c | 142.94 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.77 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.95 | kJ/kg K |
| A | 1424 | m ² |
| U_c | 0.74 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.003348 | m ² K/kW |

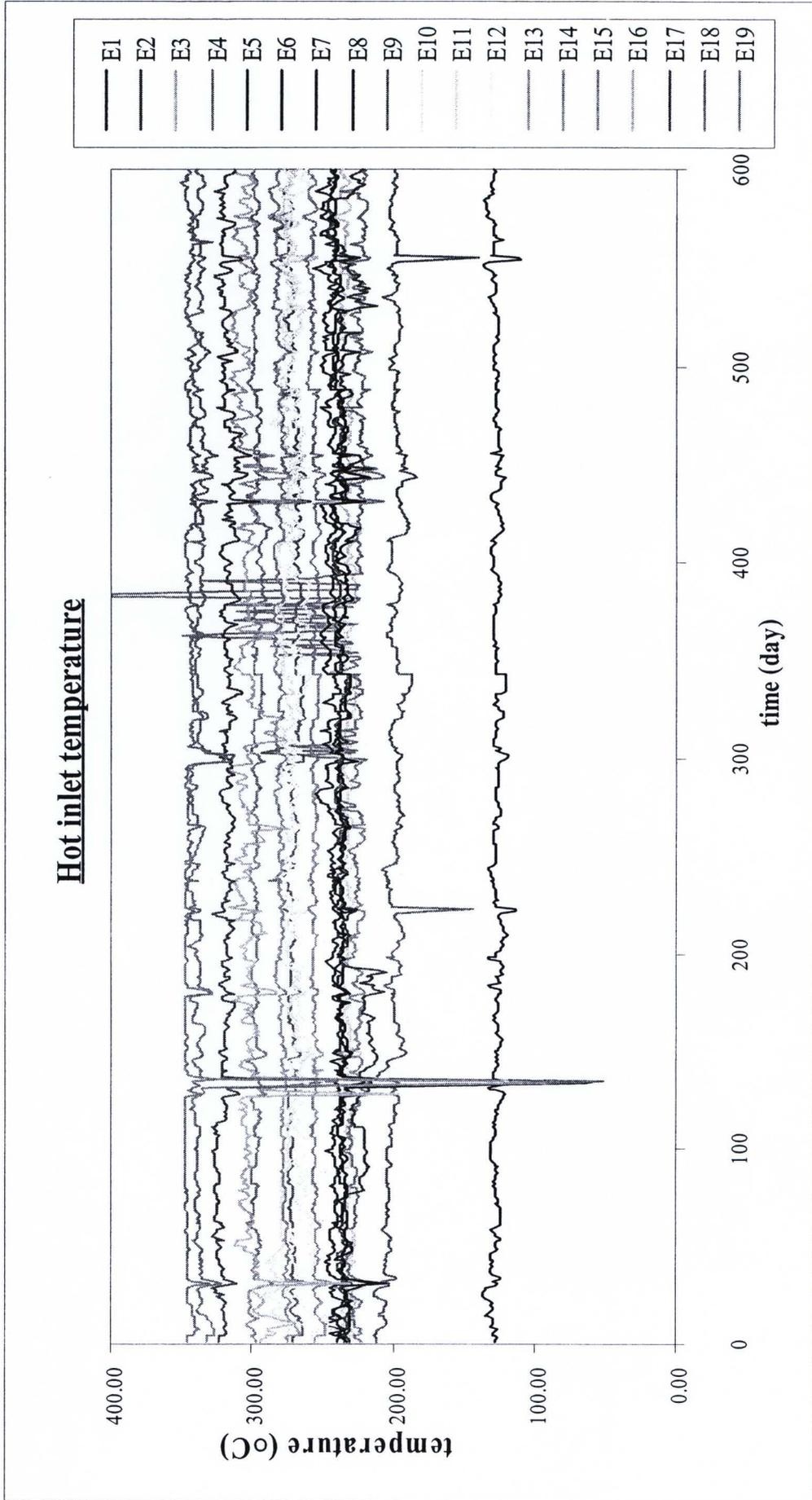
ตารางที่ 4.19 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|-----------|----------|---------------------|
| F_h | 28.04 | kg/s |
| F_c | 77.09 | kg/s |
| $C_{p,h}$ | 2.81 | kJ/kg K |
| $C_{p,c}$ | 2.95 | kJ/kg K |
| A | 1028 | m ² |
| U_c | 0.27 | kW/m ² K |
| $R_{f,c}$ | 0.002099 | m ² K/kW |

ค่าอุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อน และสายเย็นของขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่องที่ 600 วัน ดังแสดงรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ในส่วนนี้แสดงผลข้อมูลอุณหภูมิขาเข้าของสายเย็น (Crude Inlet Temperature) และ อุณหภูมิขาเข้าของสายร้อน (Hot Inlet Temperature) ที่ได้มาจากโรงงานจริง เพื่อสำหรับนำมาหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า รวมทั้งใช้เป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการสำหรับนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำไปศึกษา รูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ของระบบขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่ยกนำมาศึกษา



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิปลายทางเข้าของขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึง E19



รูปที่ 4.3 จุดหมุมิตายร้อนขาเข้าของขายนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึง E19

4.1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีจุดประสงค์เพื่อหารูปแบบของอุณหภูมิขาออกของน้ำมันดิบที่อธิบายพฤติกรรมพลวัตได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด โดยพิจารณาจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างการจำลองตามแบบจำลองสมการการเกิด ฟาวลิง 4 รูปแบบกับข้อมูลที่ได้จริงจากโรงงาน เพื่อใช้อธิบายแนวโน้มของการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน

แบบจำลองของขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากการทำสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความจำเป็นสำหรับการศึกษาและควบคุมกระบวนการ แบบจำลองที่ไม่มีความซับซ้อนสามารถเลียนแบบและสามารถจำลองกระบวนการได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและตอบสนองความต้องการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการที่สุด

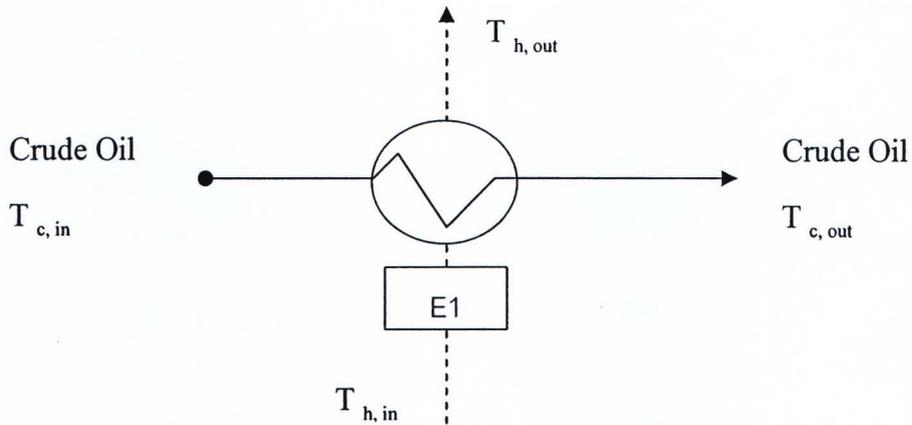
เนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการจริงในโรงงานนั้นไม่ได้มีการเก็บข้อมูลจนครอบคลุมทั้งหมดเพื่อใช้ในการจำลอง จึงมีข้อกำหนดที่ใช้ในการจำลองขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละตัวรวมจำนวน 19 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E1 ถึง E19) ดังนี้

- ไม่มีการสูญเสียพลังงานออกนอกระบบ
- อัตราการไหลของสายร้อนและสายเย็นคงที่
- ค่าความจุความร้อนของสายร้อนและสายเย็นคงที่
- พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่
- ของไหลที่พิจารณาเป็นของเหลวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยส่วนของการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 19 ส่วน (E1 ถึง E19) เชื่อมกันและมีการเข้า-ออกต่อเนื่องกัน จนกระทั่งดำเนินการเสร็จกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของขายงานในระบบแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสร้างแบบจำลองได้จากการสมดุลพลังงานแสดงได้ดังนี้

ดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

E1



สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ (สายเย็น) ได้จากสมการ

$$T_{c,out} = \frac{[F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}] (e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1})}{e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1} - [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}]} T_{h,in} + \frac{(1 - [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}]) e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1}}{e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1} - [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}]} T_{c,in} \quad (4.1)$$

และ

$$T_{h,out} = T_{h,in} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (4.2)$$

- โดยที่
- $T_{c,out}$ = อุณหภูมิสายเย็นขาออก ($^{\circ}C$)
 - F_h = อัตราการไหลของสายร้อน (kg/s)
 - F_c = อัตราการไหลของสายเย็น (kg/s)
 - $C_{p,h}$ = ค่าความจุความร้อนของสายร้อน (kJ/kgK)
 - $C_{p,c}$ = ค่าความจุความร้อนของสายเย็น (kJ/kgK)
 - U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (kW/m^2K)

$$\begin{aligned}
 A &= \text{พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m}^2\text{)} \\
 T_{h,in} &= \text{อุณหภูมิสายร้อนขาเข้า (}^\circ\text{C)} \\
 T_{c,in} &= \text{อุณหภูมิสายเย็นขาเข้า (}^\circ\text{C)}
 \end{aligned}$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned}
 a_o &= F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c} \\
 a_1 &= A / F_h C_{p,h} \\
 a_2 &= [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}] - 1 \\
 a &= a_1 a_2
 \end{aligned}$$

แทน a_o a_1 a_2 และ a ในสมการ (4.1)

$$T_{c,out} = \frac{a_o (e^{[-Ua_1][a_2]} - 1)}{e^{[-Ua_1][a_2]} - a_o} T_{h,in} + \frac{(1 - a_o) e^{[-Ua_1][a_2]}}{e^{[-Ua_1][a_2]} - a_o} T_{c,in} \quad (4.3)$$

เมื่อ $a = a_1 a_2$ จะได้

$$T_{c,out} = \frac{a_o (e^{[-Ua]} - 1)}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} + \frac{(1 - a_o) e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in} \quad (4.4)$$

จากสมการ $a_2 = [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}] - 1$ หรือ $a_2 = a_o - 1$ จะได้

$$T_{c,out} = \frac{a_o (e^{[-Ua]} - 1)}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_2 e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in}$$

$$T_{c,out} = \frac{a_o e^{[-Ua]} - a_o}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_2 e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in}$$

$$T_{c,out} = \frac{a_o e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_o}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_2 e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in}$$

$$\begin{aligned}
T_{c,out} &= \frac{e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} [a_o T_{h,in} - a_2 T_{c,in}] - \frac{a_o}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} \\
T_{c,out} &= \frac{1}{1 - \frac{a_o}{e^{[-Ua]}}} [a_o T_{h,in} - a_2 T_{c,in}] - \frac{1}{\frac{e^{[-Ua]}}{a_o} - 1} T_{h,in} \\
T_{c,out} &= \frac{1}{1 - a_o e^{[Ua]}} [a_o T_{h,in} - a_2 T_{c,in}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[Ua]}}} T_{h,in} \tag{4.5}
\end{aligned}$$

ที่ซึ่ง

$$T_{h,out} = T_{h,in} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,out} - T_{c,in}) \tag{4.6}$$

จากสมการ (4.5) ค่าตัวแปรที่ทราบและเป็นค่าคงที่ ได้แก่ a_o , a_1 , a_2 , a ที่ซึ่ง $T_{h,in}$ และ $T_{c,in}$ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ในช่วงเวลาดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน) เป็นค่าที่ทราบได้จากข้อมูลโรงงาน สำหรับค่าตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่ามีดังนี้ คือ U หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยสามารถหาค่าตัวแปรดังกล่าวได้ดังนี้

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient, U)

เมื่อกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนดำเนินการไปในช่วงระยะเวลานาน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) จะมีค่าลดลงและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จากสมการ (4.5) หากต้องการทราบค่า $T_{c,out}$ จะต้องหาค่า U มาแทนในสมการ ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สามารถคำนวณได้จากค่าแฟคเตอร์การเกิดฟาวลิงหรือค่าความต้านทานของการเกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เป็นการรวมความต้านทานการเกิดฟาวลิงของการแลกเปลี่ยนความร้อนอื่น ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนรวมที่มีการพิจารณาผลของฟาวลิงที่เกาะอยู่ที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน แฟคเตอร์ฟาวลิงหาได้จากการหาค่าของความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

$(U_{(t)})$ กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตอนเริ่มต้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (U_c) ดังสมการ (4.7)

จาก

$$R_f(t) = \frac{1}{U_{(t)}} - \frac{1}{U_c} \quad (4.7)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $U_{(t)}$ จากสมการ

$$\frac{1}{U_{(t)}} = R_f(t) + \frac{1}{U_c}$$

$$U_{(t)} = \frac{1}{R_f(t) + \frac{1}{U_c}}$$

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_f(t)} \quad (4.8)$$

การหาค่าแฟคเตอร์การเกิดฟาวลิง (Fouling factor, R_f)

การเกิดฟาวลิงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลงที่ตามระยะเวลาการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากเกิดความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น สำหรับสมการที่ใช้อธิบายการเกิดฟาวลิงที่นำมาศึกษามี 4 รูปแบบ คือ

1. สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right) \quad (4.9)$$

แทนสมการ (4.9) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)} \quad (4.10)$$

2. สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)^n \quad (4.11)$$

แทนสมการ (4.11) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)^n} \quad (4.12)$$

3. สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right) \quad (4.13)$$

แทนสมการ (4.13) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (4.14)$$

4. สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c}(1 - e^{-t/t_{p,c}}) \quad (4.15)$$

แทนสมการ (4.15) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c}(1 - e^{-t/t_{p,c}})} \quad (4.16)$$

- เมื่อ $R_f(t)$ คือ การเกิดฟาวลิงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($m^2 K / W$)
 $R_{f,c}$ คือ ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิง ($m^2 K / W$)
 t คือ เวลา (day)
 $t_{p,c}$ คือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง (day)
 n คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น

จากสมการข้างต้นสามารถนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมด 7 สมการ ได้แก่ สมการ (4.5), (4.6), (4.8), (4.10), (4.12) (4.14) และ (4.16) นำมาเขียนโปรแกรมแบบต่อเนื่อง และมีการรับส่งค่าที่สัมพันธ์กันโดยการทำสมดุลพลังงานของทั้งสายร้อนและสายเย็น ซึ่งเป็นการให้และรับความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งข้างงานในระบบทั้งหมดรวม 19 เครื่อง ตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานสำหรับนำไปเขียนในโปรแกรม เพื่อใช้ สำหรับทำนายค่าตัวแปรอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ $T_{c,out}$ ที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบข้างงานแลกเปลี่ยนความร้อนในการอุ่นน้ำมันดิบ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากการจำลองของการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ที่ได้ข้อมูลมาจากโรงงานจริง และสามารถนำแบบจำลองที่เหมาะสมกับข้างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด มาพัฒนาต่อเพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบนี้ได้ต่อไป

4.1.4 การหาค่าพารามิเตอร์

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในขบวนการ หากดำเนินการไปในระยะหนึ่งจะทำให้เกิดฟาวลิง เกาะอยู่บริเวณผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้การนำความร้อนลดลง ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เนื่องจากเกิดความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น การติดตามการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิต และติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีความสำคัญมากในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เพื่อทำการปรับปรุงและทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากสมการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา คือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) และค่าที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ทั้งนี้เพื่อนำมาแทนในแบบจำลอง แล้วหาค่ารูปแบบของอุณหภูมิขาออกที่สามารถใช้อธิบายลักษณะการเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เป็นขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่อง (E1-E19) โดยแต่ละเครื่องจะมีผลต่อเนื่องกันจากเครื่องแรกซึ่งส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องต่อไปเป็นลำดับ ดังนั้นการหาค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) และค่าที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 เป็นอันดับแรก เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 นี้ก่อน และหลังจากนั้นถัดมาจะหาค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) และค่าที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อน และสายเย็น (n) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวถัด ๆ ไปตามลำดับ สำหรับการหาค่าตัวแปรค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) และค่าตัวแปรค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) นั้น สามารถหาได้จากวิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม ผ่านการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม MATLAB เขียนสมการที่มีความสัมพันธ์กันต่อเนื่องกันทั้งหมด

วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบทีละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่อยู่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน เมื่อป้อนค่าเข้าไปในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะทำให้ได้คำตอบออกมาอย่างรวดเร็ว และสามารถใส่ข้อมูลใหม่ที่ต้องการไปได้เรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบออกมาอยู่

ในช่วงที่ยอมรับได้ หรือสามารถนำค่าที่เป็นการคำนวณปริมาณค่าข้อมูลขาเข้า (Input) ที่ต้องการ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในระดับที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้อ้างอิงในงานวิจัยได้ เมื่อค้นหาตัวแปรแบบสุ่มตามขั้นตอนจะทำให้ทราบช่วงของค่าตัวแปร $t_{p,c}, n$ ที่เหมาะสมทำให้ค่าแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง กับข้อมูลที่ได้จากการจำลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ทั้งนี้ใช้การเทียบค่าความต่างโดยอาศัยค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error) เป็นค่าที่บ่งบอกความแม่นยำ ความเที่ยงตรงของการทำนาย ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้จะต้องแทนตัวแปร $t_{p,c}, n$ เพื่อให้ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองเกิดความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างค่าที่ได้จากการจำลอง (predict) เทียบกับค่าที่ได้จริงจากโรงงาน (obs) ซึ่งแสดงว่ามีความเที่ยงตรงมากนั่นเอง การคำนวณหาค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง หรือ Root Mean Square Error (RMSE) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - predict)^2}{N}} \quad (4.17)$$

เมื่อ

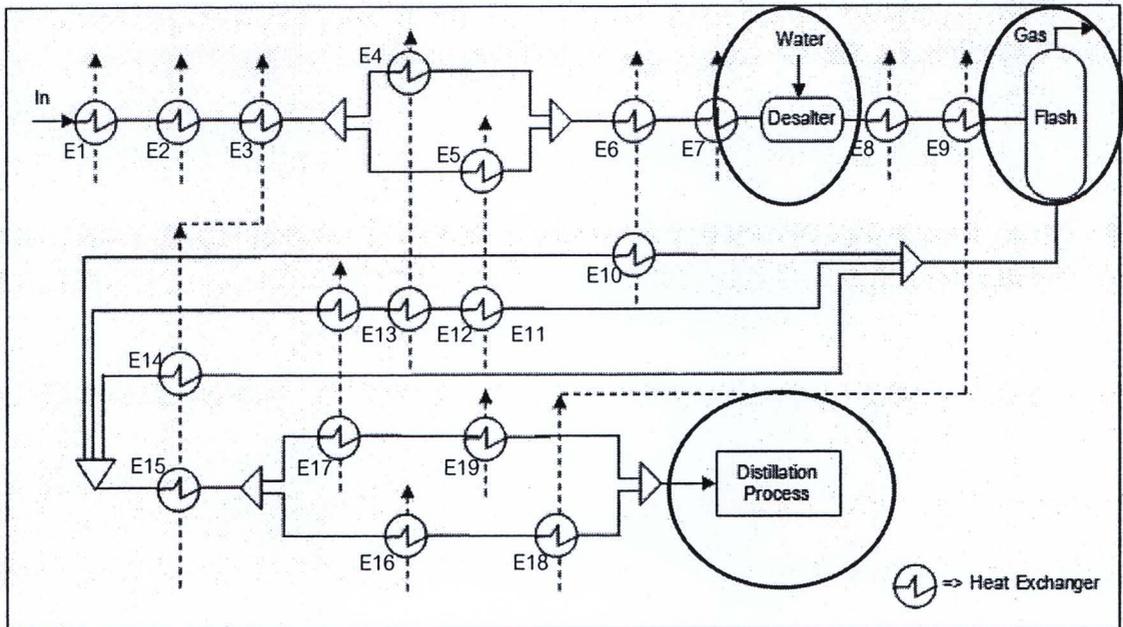
obs คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากการจำลอง

predict คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากข้อมูลโรงงาน

N คือ จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด

4.2 การพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ

เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการจำลองเลียนแบบกระบวนการ ของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา ผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าจากโรงงานจริง จะทำให้ได้รูปแบบจำลองของการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมแล้วนั้น ในส่วนนี้จะเป็นการพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ



รูปที่ 4.4 แผนภาพกระบวนการหลัก 3 กระบวนการในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบมีกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งกระบวนการเหล่านี้หากอุณหภูมิของน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบไม่ได้คุณภาพและยังต้องสูญเสียพลังงานสำหรับการให้ความร้อนกับน้ำมันดิบ การหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นคอขวด (Critical Heat Exchanger) ของข่ายงานในระบบ โดยวิธีการนำรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับการเกิดฟาวลิงจริงของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบมาพัฒนาแบบจำลอง เมื่อลดค่าตัวแปรพารามิเตอร์ $t_{p,c}, n$ ที่หามาได้จากข้างต้น (หัวข้อ 4.1) ลงมา 10% ของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงาน เพื่อหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ระบบข่ายงานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด ในการเพิ่มค่าอุณหภูมิน้ำมันดิบให้สามารถส่งเข้าสู่กระบวนการทั้ง 3 กระบวนการหลักได้ตามค่าที่กำหนดตามพื้นฐานคุณภาพ เนื่องจากที่เวลาการทำงานต่อเนื่องที่ 600 วัน หากค่าตัวแปรพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจนมีผลทำให้แฟคเตอร์การเกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มขึ้นนั้น จากความสัมพันธ์ของสมการจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนรวม $U_{(t)}$ มีค่าลดลง และส่งผลให้อุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ $T_{c,out}$ มีค่าลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้การพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวจะทำให้ทราบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวใดในข่ายงานที่เป็นคอขวด (Critical Heat Exchanger) และควรดูแลมากเป็นพิเศษ เพื่อให้ให้เกิดผลกระทบบกผลิตภัณฑ์และข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ $t_{p,c}$ และ n เพื่อนำมาแทนในแบบจำลองการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 แบบจำลอง จนกระทั่งได้ทราบรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 19 เครื่องในข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา ให้นำแบบจำลองที่ได้มาตั้งเป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลอง เพื่อใช้ในการหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นคอขวดของข่ายงาน (Critical Heat Exchanger) โดยเน้นที่อุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการหลัก 3 กระบวนการได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ทั้งนี้สามารถหาได้จากค่าพลังงานความร้อนที่ต้องเพิ่มให้กระบวนการ เมื่อเกิดฟาวลิงเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาจนกระทั่งส่งผลกระทบให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง และมีผลทำให้อุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ลดลง หรือกล่าวได้ว่าสมรรถนะทางความร้อนลดลงนั่นเอง

จากสมการ (4.10), (4.12), (4.14) และ(4.16) อธิบายความสัมพันธ์ของการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบได้แก่ สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) และสมการแบบเอกไปเนนเซียล (Asymptotic fouling model) ซึ่งจากสมการตัวแปรที่มีผลทำให้เกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มสูงขึ้นที่เวลาเปลี่ยนแปลงไปก็คือ $t_{p,c}$ และ n จากความสัมพันธ์ของสมการหากต้องการให้ค่าฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มสูงขึ้นนั้นจะต้องทำให้ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) ลดลง สำหรับสมการที่มีค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) หากต้องการให้ค่าฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มสูงขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยเพิ่มค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ให้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

การพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน จนกระทั่งส่งผลให้ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำมันผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถเทียบหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานในส่วนนี้เพิ่มมากที่สุด จึงได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรพารามิเตอร์ $t_{p,c}$ และ n โดยกำหนดให้ค่า $t_{p,c}$ ลดลง 10 % และค่า n เพิ่มขึ้น 10 % เช่นเดียวกัน ซึ่งค่าตัวแปร $t_{p,c}$ และ n ที่ลดและเพิ่มดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ต้องส่งเข้าทั้ง 3 กระบวนการ เพื่อให้เกิดการเทียบต่างของค่าการสูญเสียพลังงาน (Q) จึงใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\Delta Q = Q_{Desalt} + Q_{Pr\ flash} + Q_{Distillation} \quad (4.18)$$

ที่ซึ่ง

$$\Delta Q = \Sigma [\dot{m} C_p (\Delta T)_{Desalt} + \dot{m} C_p (\Delta T)_{Pr\ flash} + \dot{m} C_p (\Delta T)_{Distillation}] \quad (4.19)$$

- เมื่อ ΔQ คือ พลังงานความร้อน (kW)
 \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
 C_p คือ ค่าความจุความร้อน (kJ/kgK)
 ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิขาออกระหว่าง Model Basis กับ New Model (K)

แบบจำลองของขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการเทียบหารูปแบบสมการ การเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E1 ถึง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9 จะถูกนำมาเขียนแบบจำลองเรียงต่อกัน จากนั้น เพิ่มสมการ (4.18) และ (4.19) เพื่อหาค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียไป เมื่อค่าการเกิดฟาวลิง เพิ่มขึ้นโดยการลดค่า $t_{p,c}$ และเพิ่มค่า n ที่ 10 % ที่เวลาการดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน ใน กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 19 เครื่อง โดยในแต่ละเครื่องจะมี ผลต่อเนื่องกันจากส่วนแรก ซึ่งส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของส่วนต่อไปเป็นลำดับ สำหรับการลดค่า $t_{p,c}$ และเพิ่มค่า n นั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงไปที่ละเครื่อง โดยเริ่มต้นที่เครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน E1 เป็นอันดับแรกก่อน แต่ละเครื่องก็จะแบ่งเป็น 2 กรณีของการ เปลี่ยนแปลง กรณีแรกเปลี่ยนแปลงค่าของ $t_{p,c}$ ที่ค่า n คงที่ กรณีที่สองเปลี่ยนแปลงค่าของ n ที่ ค่า $t_{p,c}$ หลังจากนั้นก่อนจะเริ่มดำเนินการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวต่อไปก็ให้เริ่มที่ แบบจำลองเดิมที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ และเริ่มเปลี่ยนแปลงค่า $t_{p,c}$ และค่า n เช่นเดียวกันกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ตามลำดับ ทำซ้ำที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัว ถัด ๆ ไปจนกระทั่งครบทั้งขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ตั้งแต่ E1 ถึง E19)

หลังจากที่ทราบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวใดในขบวนการที่เป็นคอขวดทำให้เกิดการ สูญเสียพลังงานความร้อน (Q) มากที่สุด ซึ่งอาจจะขึ้นอยู่กับกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่า $t_{p,c}$ หรือกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่า n ในส่วนนี้จะนำมาศึกษาสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ มีผลทำให้ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด (Critical Heat Exchanger) เมื่อเปลี่ยนแปลง

ค่า $t_{p,c}$ หรือค่า n โดยลดค่าเวลาในการเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ และเพิ่มค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น n ทุก ๆ 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองกับค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับช่างาน ที่มีผลต่อค่าการสูญเสียพลังงานความร้อน (Q) ในการทำให้สมรรถนะทางความร้อนของช่างานกลับมาอยู่ในสภาวะเดิม จากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $t_{p,c}$ และ n ดังกล่าว จะทำให้สามารถนำลักษณะแนวโน้มที่เกิดขึ้นมาอธิบายความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการทำนายปริมาณพลังงานที่สูญเสีย จากช่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้สภาวะของการเกิดฟาวลิงที่เวลาเปลี่ยนไป