บทที่ 4
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทบทวนงานวิจัยด้านแบบจำลองที่ผ่านมา จึงเลือกสร้างแบบจำลองจากสมการควบคุมที่ประกอบด้วย สมการทรงมวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน พร้อมทั้งใช้สมมุติฐานที่จำเป็น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลอง

1 ความหนาฟิล์มที่ไหลออกจากแท่งของเหลว และความถี่ในการเกิดฟองไอในแท่งของเหลวมีค่าคงที่ คือ 0.2 mm และ 1,000 Hz ตามลำดับ สืบเนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา

2 ฟองไอถูกสมมุติว่าเป็นก๊าซอุดมคติ อุณหภูมิฟองไอมีค่าคงที่ตลอดฟองไอ และแท่งของเหลวมีคุณสมบัติไม่อัดตัว

3 ความดันสูญเสียในช่วงโค้งเลี้ยวถือว่าน้อยมากจนละทิ้ง

4 การถ่ายเทมวลที่หน้าสัมผัสฟองไอแท่งของเหลวน้อยมากจนละทิ้ง

5 ขนาดความยาวฟองไอเริ่มต้นเมื่อเกิดการเดือดมีค่า 10 μm เป็นค่าความยาวประสิทธิผลเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองไอที่หลุดออกจากผนังจากการศึกษาเชิงทัศน์

6 ขนาดความยาวฟองไอหรือแท่งของเหลวที่น้อยกว่า 1 μm จะละทิ้งไม่นำมาพิจารณา

7 พิจารณาความดันสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด ด้วยความดันสูญเสียรอง (Minor loss) ตามทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล

4.2 สมการควบคุมพื้นฐาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ สร้างขึ้นจากสมการควบคุมพื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วย สมการพื้นฐานทั้ง 3 คือ กฎทรงมวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ดังนั้นจะแยกการอธิบายสมการควบคุมต่างๆ ตามรูปแบบของการไหลสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นที่เคยสังเกตได้จากการศึกษาเชิงทัศน์ โดยแยกรูปแบบของสารทำงานออกเป็น 2 สถานะ 3 ลักษณะการไหล คือ

1 การไหลสถานะของเหลวแบบแท่งของเหลว

2 การไหลสถานะของเหลวแบบฟิล์มของเหลว

3 การไหลสถานะไอ

สมการควบคุมพื้นฐานของทั้ง 3 รูปแบบการไหลนี้ สร้างขึ้นโดยรวมปรากฏการณ์ทางกายภาพต่างๆ ที่สังเกตเห็นจากการศึกษาเชิงทัศน์ สามารถแยกออกเป็นดังนี้

4.2.2 กฎทรงมวล

กฎทรงมวล คือการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงมวลที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น กฎทรงมวลสำหรับปริมาตรควบคุมใดๆ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในนั้นจะเท่ากับมวลทั้งหมดที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุมนั้นและภายในปริมาตรควบคุมนั้นมวลไม่มีการเกิดหรือสูญหายไป ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{4.1}$$

ซึ่งแยกกฎทรงมวลของทั้งสามรูปแบบการไหลออกเป็นดังนี้

4.2.2.1 กฎทรงมวลของไหลสถานะฟองไอ

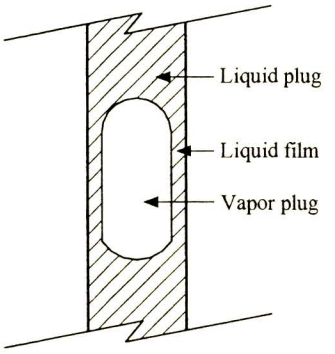
จากนิยามของกฎทรงมวล เมื่อพิจารณาฟองไอใดๆ แล้วพบว่า มวลทั้งหมดที่ไหลผ่านเข้าหรือออกปริมาตรควบคุม เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างฟองไอแท่งของเหลว (ตามแนวแกนท่อ) และระหว่างฟองไอฟิล์มของเหลว (ตามแนวขวางท่อ) ดังรูปที่ 4.1 จากเงื่อนไขข้อ 4 ที่ใช้ในแบบจำลองการทำงานที่กล่าวไว้ว่า ไม่พิจารณาปฏิกิริยาระหว่างรอยต่อฟองไอและแท่งของเหลว ดังนั้น กฎทรงมวลของฟองไอจะประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงมวลที่ผิวหน้าสัมผัสฟองไอและฟิล์มของเหลว โดยการเปลี่ยนแปลงมวลฟองไอนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ฟองไออยู่ กล่าวคือ เมื่อฟองไออยู่ในส่วนทำระเหย มวลฟองไอจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการระเหยของฟิล์มของเหลว ในขณะที่ฟองไออยู่ในส่วนควบแน่น มวลฟองไอจะลดลงเนื่องจากการควบแน่นของฟองไอตามสมการการควบแน่นของ Nusselt ซึ่งสามารถเขียนสมการกฎทรงมวลของฟองไอได้ดังนี้

$$\frac{dm_{vi}}{dt} = \frac{\pi D k_{fi} (T_e - T_{vi}) L_{ve}}{\delta_{fi} h'_{fg,e}} - \frac{0.943}{h'_{fg,c}} \left[\frac{g \rho_{fi} (\rho_{fi} - \rho_{vi}) k_{fi}^{\,3} h'_{fg,c}}{\mu_{fi} (T_{vi} - T_c) L_{vc}} \right]^{1/4} \pi D L_{vc} (T_{vi} - T_c) \tag{4.2}$$

โดยค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอดัดแปลง สามารถแทนได้จาก

$$h'_{fg,e} = h_{fg} + 0.68 C_{pfi} (T_e - T_{vi}) \tag{4.3}$$

$$h'_{fg,c} = h_{fg} + 0.68 C_{pfi} (T_{vi} - T_c) \tag{4.4}$$



รูปที่ 4.1 หน้าสัมผัสฟองไอ

4.2.2.2 กฎทรงมวลของแท่งของเหลว

ตามรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณากฎทรงมวลในทำนองเดียวกับสถานะไอ และเงื่อนไขในข้อ 4 คือไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงมวลที่รอยต่อฟองไอแท่งของเหลว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงมวลเข้าออกของแท่งของเหลวเกิดเนื่องจากการไหลเข้าหรือออกของฟิล์มของเหลวเท่านั้น จะได้สมการกฎทรงมวลของแท่งของเหลว ดังนี้

$$\frac{dm_{li}}{dt} = \dot{m}_{in,fi} - \dot{m}_{out,fi} \tag{4.5}$$

เมื่อ $\dot{m}_{in,fi}$ และ $\dot{m}_{out,fi}$ คือมวลที่ไหลเข้าและออกจากฟิล์มของเหลว ตามลำดับ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\dot{m}_{in,fi} = \int v_{in,fi} dA \tag{4.6}$$

$$\dot{m}_{out,fi} = \int v_{out,fi} dA \tag{4.7}$$

เมื่อ $v_{in,fi}$ และ $v_{out,fi}$ คือ ความเร็วที่ไหลเข้าและออกจากฟิล์มของเหลว ตามลำดับ

A คือ พื้นที่หน้าตัดฟิล์มของเหลว

4.2.2.3 กฎทรงมวลของฟิล์มของเหลว

กฎทรงมวลของฟิล์มของเหลวคือส่วนกลับของกฎทรงมวลฟองไอและแท่งของเหลว ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{dm_{fi}}{dt}=\frac{0.943}{h'_{fg,c}}\left[\frac{g\rho_{fi}\left(\rho_{fi}-\rho_{vi}\right)k_{fi}{}^{3}h'_{fg,c}}{\mu_{fi}\left(T_{vi}-T_{c}\right)L_{vc}}\right]^{1/4}\pi DL_{vc}\left(T_{vi}-T_{c}\right)$$
$$+\dot{m}_{in,fi}-\frac{\pi Dk_{fi}\left(T_{e}-T_{vi}\right)L_{ve}}{\delta_{fi}h'_{fg,e}}-\dot{m}_{out,fi} \qquad (4.8)$$

สมการข้างต้น ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงมวลเนื่องจากการระเหย มวลที่ไหลเข้าสู่ฟิล์มของเหลว การระเหยที่ส่วนควบแน่น และการไหลออกจากฟิล์ม

4.2.3 สมการโมเมนตัม

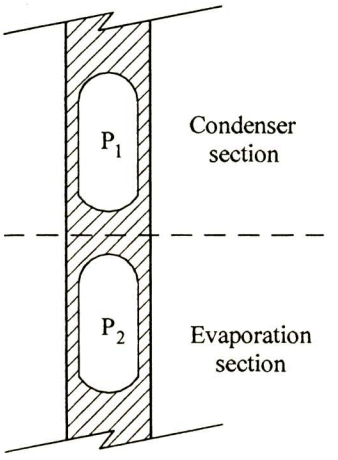
ในทางกายภาพ โมเมนตัมคือปริมาณทางกายภาพที่สัมพันธ์กับความเร็วและมวลของวัตถุ การอนุรักษ์โมเมนตัมคือผลรวมของโมเมนตัมทั้งหมด โดยผลรวมทางเวคเตอร์ของโมเมนตัมทั้งหมดไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาภายในใดๆ ดังนั้นสมการโมเมนตัมจะมีประโยชน์ในการคำนวณหาความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ สำหรับท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดนั้น สมการโมเมนตัมประกอบด้วย

4.2.3.1 สมการโมเมนตัมของฟองไอ

โมเมนตัมของฟองไอเกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่กระทำต่อฟองไอ อันประกอบด้วย ความแตกต่างความดันของแท่งของเหลวที่คร่อมอยู่ระหว่างฟองไอ (รวมผลของแรงลอยตัวเนื่องจากแรงตึงผิว) ความเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อฟองไอเคลื่อนที่ และแรงเนื่องจากน้ำหนักของฟองไอ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d\left(m_{vi}v_{vi}\right)}{dt}=\left(P_{li-1}-P_{li}\right)\frac{\pi D^{2}}{4}-\tau_{vi}\pi DL_{vi}+\rho_{vi}gL_{vi} \qquad (4.9)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 4.2 กายภาพสารทำงานในท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด

4.2.3.2 สมการโมเมนตัมแท่งของเหลว

โมเมนตัมของแท่งของเหลวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่กระทำต่อแท่งของเหลว อันประกอบด้วยความแตกต่างความดันของฟองไอ (รวมผลของแรงตึงผิว) ความแตกต่างความดันของแท่งของเหลว ที่คร่อมอยู่ระหว่างแท่งของเหลว ความเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อแท่งของเหลวเคลื่อนที่ และแรงเนื่องจากน้ำหนักของแท่งของเหลว มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d\left(m_{li}v_{li}\right)}{dt}=\left(P_{vi}-P_{vi+1}\right)\frac{\pi D^2}{4}+\frac{dP_{li}}{dx}L_{li}\frac{\pi D^2}{4}-\tau_{li}\pi DL_{li}+\rho_{li}gL_{li} \qquad (4.10)$$

4.2.3.3 สมการอนุรักษ์โมเมนตัมฟิล์มของเหลว

ในกรณีที่ฟิล์มของเหลวไหลที่ความเร็วต่ำ สามารถสมมติให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ ดังนั้น สมการโมเมนตัมของฟิล์มของเหลว สามารถหาได้จากงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ของ Zhang *et al.*, 2002 ซึ่งแสดงไว้ดังนี้

$$v_{fi}=-\frac{1}{2\mu_{fi}}\frac{dP_{fi}-\rho_{fi}gL_{fi}}{dx}\left(2\eta\delta-\eta^2\right) \qquad (4.11)$$

4.2.4 กฎอนุรักษ์พลังงาน

กฎอนุรักษ์พลังงาน (กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์) เป็นหนึ่งในสมการควบคุม ที่อธิบายถึง พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับพลังงานที่ไหลเข้าของระบบลบพลังงานที่ไหลออกของระบบ ในอีกความหมายหนึ่งพลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งแต่ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่หรือสูญหายไปได้ ซึ่งสมการกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์คือ

$$Q = \Delta U + W \tag{4.12}$$

เมื่อ Q คือ การถ่ายเทความร้อนผ่านเข้าออกจากสิ่งแวดล้อม

W คือ งานที่เกิดขึ้นของระบบ

U คือ พลังงานภายในของระบบ โดยการตัดผลของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์

4.2.4.1 สมการพลังงานของฟองไอ

กฎทรงพลังงานของฟองไอ ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน การถ่ายเทความร้อนเข้าออกระหว่างหน้าสัมผัส ฟองไอฟิล์มของเหลว และงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวจากการเปลี่ยนแปลงของความดัน ซึ่งสมการพลังงานของฟองไอ หาได้ดังนี้

$$m_{vi}C_{vi}\frac{dT_{vi}}{dt} = \left(\frac{\pi D k_{fi}\left(T_e - T_{vi}\right)L_{ve}}{\delta h'_{fg,e}} - \frac{0.943}{h'_{fg,c}}\left[\frac{g\rho_{fi}\left(\rho_{fi}-\rho_{vi}\right)k_{fi}{}^3 h'_{fg,c}}{\mu_{fi}\left(T_{vi}-T_c\right)L_{vc}} \right]^{1/4} \pi D L_{vc}\left(T_{vi}-T_c\right) \right) RT_{vi}$$

$$- P_{vi}\frac{\pi D^2}{4}\frac{dx_{vi}}{dt} \tag{4.13}$$

4.2.4.2 สมการพลังงานของแท่งของเหลว

สมการพลังงานของแท่งของเหลวหาได้จากการแก้สมการการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังและแท่งของเหลว จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{1}{\alpha_{lij}}\frac{dT_{lij}}{dt} = \frac{d^2T_{lij}}{dt^2} - \frac{h_{lij}\pi D}{k_{lij}\pi D L_{lij}}\left(T_{lij} - T_{wij}\right) \tag{4.14}$$

4.2.4.3 สมการพลังงานของฟิล์มของเหลว

การพิจารณาสมการพลังงานของฟิล์มของเหลว แยกตามลักษณะการเปลี่ยนสถานะออกเป็น 2 ส่วน คือ เนื่องจากการระเหยและการควบแน่น ดังนี้

สมการพลังงานของฟิล์มของเหลวเนื่องจากการระเหย (Zhang *et al.*, 2002)

$$\rho_{fi} R_g T_{vi} b \ln\left(\frac{\delta_{tr}}{\delta_0}\right) + \sigma\left(\frac{-6L_{fi}\tan\alpha - 12\left(\delta_0 - \delta_{tr}\right)}{L_{fi}^2} + \frac{\left(\delta_0 - \delta_{tr}\right)}{\left(R-\delta_0\right)\left(R-\delta_{tr}\right)}\right)$$
$$= \frac{3\mu_{fi}}{2\pi R\rho_{fi}} \int_0^{L_{fi}} \frac{1}{\delta_{fi}^3}\left(\dot{m}_{fi,in} - \frac{Q}{h'_{fg,e}}\right)dx \qquad (4.15)$$

สมการพลังงานของฟิล์มของเหลวเนื่องจากการควบแน่น (Zhang *et al.*, 2002)

$$\frac{\sigma h'_{fg,c}\rho_{fi}}{3\mu_{fi}}\left[\frac{\delta_{tr}^3}{R-\delta_{tr}}\right] = k_{fi}\left(T_{vi} - T_c\right)\int_0^{L_{fi}} \frac{1}{\delta_{fi}}dx \qquad (4.16)$$

4.3 สมการอื่นๆ

4.3.1 สมการก๊าซในอุดมคติ

สมการก๊าซในอุดมคติใช้ในการคำนวณหาความดันของฟองไอที่สอดคล้องกับอุณหภูมิปริมาตรและมวลที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงได้ดังนี้

$$P_{vi}V_{vi} = m_v RT_{vi} \qquad (4.17)$$

4.3.2 สัมประสิทธิ์ความฝืดของแท่งของเหลวและผนังท่อ

สัมประสิทธิ์ความฝืดของแท่งของเหลวและผนังท่อแยกออกตามลักษณะการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีค่าตามสมการดังนี้

การไหลแบบราบเรียบ

$$f = 64/\mathrm{Re} \qquad \mathrm{Re} \le 2300 \qquad (4.18)$$

การไหลแบบปั่นป่วน

$$f = 0.3164\,\mathrm{Re}^{-0.25} \qquad 2300 < \mathrm{Re} < 10^5 \qquad (4.19)$$

4.3.3 ค่าการสูญเสียรองจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างทันทีทันใด

ค่าการสูญเสียรองจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างทันทีทันใด หาได้จากทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล

4.3.4 สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาของแท่งของเหลว

สัมประสิทธิ์การพาของแท่งของเหลวนี้ใช้ในการแก้สมการพลังงานเพื่อหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดแท่งของเหลวซึ่งแยกการพิจารณาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

ช่วงที่ 1 ช่วงการไหลแบบราบเรียบ $\mathrm{Re} < 2200$

$$Nu = \frac{1}{4L_l^*} \ln\left(\frac{1}{\theta_m^*}\right) \tag{4.20}$$

เมื่อ

$$L_l^* = \frac{L_{li}/D}{\mathrm{Re}_D \,\mathrm{Pr}} \tag{4.21}$$

$$\theta_m^* = 8\sum_{n=0}^{\infty} \frac{G_n}{\lambda_n^2} \exp\left(-2\lambda_n^2 L_l^*\right)$$

ค่าคงที่และค่าไอเจ้นของอนุกรม Graetz หาได้จากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่และค่าไอเจ้นของอนุกรม Graetz

n	λ_n	G_n
0	2.704	0.7488
1	6.679	0.5438
2	10.673	0.4629
3	14.671	0.4154
4	18.67	0.3829
5	22.67	0.3587

ช่วงที่ 2 ช่วงแปรเปลี่ยน $2200 < \mathrm{Re} < 10000$

$$Nu = 0.012\left(\left|\mathrm{Re}\right|^{0.87} - 280\right)\mathrm{Pr}^{0.4}\left(\frac{\mu_m}{\mu_w}\right)^{0.11}\left[1+\left(\frac{D}{L_{li}}\right)^{2/3}\right] \tag{4.22}$$

ช่วงที่ 3 ช่วงปั่นป่วน $\mathrm{Re} > 10000$

$$Nu = 0.0236\left|\mathrm{Re}\right|^{0.8}\mathrm{Pr}^{0.43}\left(\frac{\mu_m}{\mu_w}\right)^{0.25} \tag{4.23}$$

4.4 ขั้นตอนการแก้สมการ

เนื่องจากสมการควบคุมพื้นฐานอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ สามารถแก้สมการหาคำตอบโดยใช้หลักการ Finite Difference เพื่อคำนวณหาค่าที่เวลาใหม่ (t + Δt) โดยการกระจายสมการที่เกี่ยวข้อง และใช้ค่าที่เวลาเดิม (t) จะได้สมการใหม่ที่ใช้คำนวณดังนี้

$$m_{vi}^{new} = m_{vi} + (\dot{m}_{in,vi} - \dot{m}_{out,vi})\Delta t \tag{4.24}$$

$$T_{vi}^{new} = T_{vi} + \frac{\left(\dot{m}_{in,vi} - \dot{m}_{out,vi}\right)C_P T_{vi}\Delta t - P_{vi} A \Delta X_{vi}}{m_{vi} C_V} \tag{4.25}$$

$$P_{vi}^{new} = \frac{m_{vi} R T_{vi}}{V_{vi}} \tag{4.26}$$

$$m_{li}^{new} = m_{li} + \frac{1}{2}\left((\dot{m}_{in,vi} - \dot{m}_{in,vi}) + (\dot{m}_{in,v(i+1)} - \dot{m}_{in,v(i+1)})\right)\Delta t \tag{4.27}$$

$$m_{li}^{new} v_{li}^{new} = m_{li} v_{li} + \left[\left(P_{vi} - P_{v(i+1)}\right)A - \pi d L_{li}\tau - (-1)^n m_{li} g\right]\Delta t \tag{4.28}$$

เนื่องจากความดันสูญเสียในช่วงโค้งเลี้ยวมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ ส่งผลให้สามารถยืดท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดที่โค้งไปมาออกเป็นลักษณะเส้นตรง ดังนั้นตำแหน่งของทุกๆ แท่งของเหลวและฟองไอในท่อความร้อนแบบสั่นจะอยู่ในช่วงความยาวของท่อความร้อนเมื่อพิจารณาวัดตามแนวแกนจากพิกัดเริ่มต้นที่ปลายปิดด้านซ้ายของท่อความร้อนแบบสั่น (ดังรูปที่ 4.2) และสามารถหาค่าตำแหน่งที่เวลาเปลี่ยนแปลงได้ดังสมการ (4.29) ในขณะที่สมการ (4.30) คือเงื่อนไขที่ขอบ

$$\begin{aligned} X_{re,i}^{new} &= X_{re,i} + v_{li}\Delta t \\ X_{le,i}^{new} &= X_{le,i} + v_{l(i-1)}\Delta t \end{aligned} \tag{4.29}$$

$$\begin{aligned} X_{re,N} &= L \\ X_{le,1} &= 0 \end{aligned} \tag{4.30}$$

เมื่อ N คือจำนวนฟองไอ และระยะ X วัดจากจุดเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 4.3

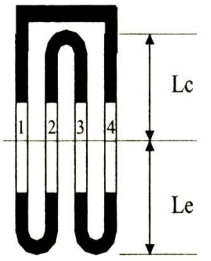
$$\begin{aligned} \Delta X_{re,i}^{new} &= X_{re,i}^{new} - X_{re,i} \\ \Delta X_{le,i}^{new} &= X_{le,i}^{new} - X_{le,i} \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{re,N}^{new} &= 0 \\ \Delta X_{le,1}^{new} &= 0 \end{aligned} \tag{4.32}$$

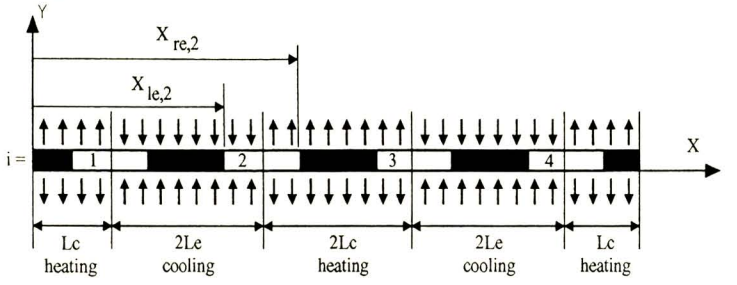
$$\Delta X_{vi}^{new} = \Delta X_{re,i}^{new} - \Delta X_{le,i}^{new} \tag{4.33}$$

เมื่อ ΔX_{vi}^{new} คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ปลายของฟองไอที่ i

$\Delta X_{re,i}$ และ $\Delta X_{le,i}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของฟองไอที่ i ด้านขวาและด้านซ้ายมือ ตามลำดับ



(ก) CLPHP



(ข) ตำแหน่งฟองไอ – แท่งของเหลว

รูปที่ 4.3 แบบจำลองท่อความร้อนแบบสั่น

4.5 โครงสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองการทำงานซึ่งใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทำนายการเคลื่อนที่ ค่าการส่งถ่ายความร้อนในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบถูกจัดทำขึ้น แบบจำลองอย่างง่ายพิจารณาการไหลแต่ละสถานะโดยมีเงื่อนไขที่ขอบที่ใช้เชื่อมโยงของไหลแต่ละสถานะ นำหลักการและทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาแก้สมการเชิงตัวเลข นอกจากสมมุติฐานในหัวข้อ 4.1 และสมการควบคุมในหัวข้อ 4.2 แล้วยังมีการเพิ่มเงื่อนไขบางประการตามบทความทางวิชาการที่เผยแพร่ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1 เงื่อนไขการก่อตัวเป็นแท่งของเหลว คือ ฟิล์มของเหลวที่ไหลลงตามแรงโน้มถ่วงอย่างต่อเนื่องนั้นจะสะสมเป็นของเหลวที่บริเวณโค้งเลี้ยวผิวท่อด้านล่างหากบริเวณโค้งเลี้ยวด้านล่างปกคลุมด้วยฟองไอเท่านั้น ระดับการสะสมนี้จะเพิ่มมากขึ้นมากขึ้นจนสูงถึงผิวท่อด้านบน หลังจากนั้นฟองไอที่ปกคลุมโค้งเลี้ยวนี้จะแยกตัวออกเป็น 2 ฟองไอในขณะที่มีแท่งของเหลวเข้ามาคั่นกลางฟองไอทั้ง 2 นั้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ได้รวมเข้าไปในแบบจำลองด้วย

2 เงื่อนไขตำแหน่งการเกิดฟองในแท่งของเหลว ในการจำลองแบบจำลองนี้ตั้งสมมุติฐานให้ฟองไอใหม่นั้นเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแท่งของเหลว แต่แท่งของเหลวที่มีขนาดสั้นกว่า 0.1 mm จะอนุมานว่าไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์การเดือดขึ้นได้

3 เพื่อให้สอดคล้องกับการทดลอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงค่อยๆ เพิ่มค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยแบบขั้นบันไดจากอุณหภูมิห้องถึงค่าที่ต้องการคำนวณ อีกทั้งเป็นข้อดีในการหลีกเลี่ยงปัญหาการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของแท่งของเหลวในเวลาเริ่มต้นการคำนวณ

4.6 รายละเอียดของโครงสร้างโปรแกรม

4.6.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแม็ทแล็บ (MatLab) ของบริษัท แม็ทเวิรค์ (Mathwork) ช่วยในการแก้สมการควบคุมตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เมื่อป้อนข้อมูลเริ่มต้นที่เหมาะสม โปรแกรมจะทำการคำนวณตาม Flow chart ที่ตั้งไว้ ทำการประมวลผลและแสดงผลการคำนวณทั้งลักษณะการเคลื่อนที่และค่าการส่งถ่ายความร้อน

แบบจำลองพฤติกรรมของเหลวและไอภายในท่อความร้อนแบบสั่นนี้ สามารถสร้างเป็นแผนภูมิการทำงานได้ตามรูป 4.4 ถึง รูป 4.7 ซึ่งจะประกอบด้วยผังหลัก และ 4 ผังย่อย และสามารถอธิบายหลักการของแต่ละ Flow chart ได้ดังนี้

4.6.1.1 ผังหลักโปรแกรม เป็นผังหลักของโปรแกรม ทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้แล้วทำการคำนวณรวมทั้งควบคุมการทำงานของโปรแกรมย่อยอื่นๆ และส่งผลการคำนวณกลับสู่ผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 หลักการทำงานของโปรแกรมหลักประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1 รับค่าข้อมูลจากผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลที่รับเข้ามาจะต้องสอดคล้องกับลักษณะโปรแกรม อาทิเช่น ชนิดของสารทำงาน มิติของค่าเริ่มต้น อย่างไรก็ดีมีการตรวจสอบข้อมูลที่ป้อนเข้ามาด้วยว่าสอดคล้องหรือไม่ หากไม่สอดคล้องโปรแกรมจะหยุดการคำนวณและเตือนผู้ใช้

2 กำหนดเวลาเริ่มต้น (t=0) เชื่อมต่อโปรแกรมย่อยใช้งานอื่นตามลำดับดังนี้

- Tube_Position_B
- Definition position
- Working fluid
- Nu_liquid

3 ปรับขั้นเวลาให้เพิ่มขึ้นตามขั้นเวลาที่โปรแกรมกำหนด ทำการคำนวณซ้ำโปรแกรมย่อยต่างๆ อีกครั้ง จนกว่าจะถึงเวลาที่ต้องการคำนวณ โปรแกรมจะบันทึกผลการคำนวณไว้ใน Hard disk อาทิเช่น ขนาดความยาวของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดที่ทุกๆ 1 ms นอกจากนี้ยังมีการแสดงค่าการส่งถ่ายความร้อน และแสดงตำแหน่งของสารทำงานที่เวลาใดในรูปแบบไฟล์รูปภาพพร้อมทั้งบันทึกลงใน Hard disk โดยอาศัยโปรแกรมย่อย Plot position

4.6.1.2 ผังย่อย (1) ใช้ในการคำนวณหาความยาวแท่งฟองไอ ของเหลว ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น โดยการคำนวณหาค่าความยาวต่างๆ นี้ จะคำนวณจากข้อมูลที่ป้อนเข้ามา อันได้แก่ เรขาคณิตของท่อความร้อน สัดส่วนการเติมสารทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.6.1.3 ผังย่อย (2) ใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติสารทำงาน ซึ่งแบบจำลองนี้ต้องการทำนายพฤติกรรมการทำงานของสาร 3 ชนิด คือ เอทานอล R123 และน้ำ ดังนั้นหากต้องการทำนายสารทำงานอื่นก็สามารถทำได้ง่ายโดยการเพิ่มโปรแกรมย่อยสารทำงานนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

4.6.1.4 ผังย่อย (3) ผังย่อยนี้จะนำค่าคุณสมบัติสารทำงานที่ได้ และลักษณะทางกายภาพของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

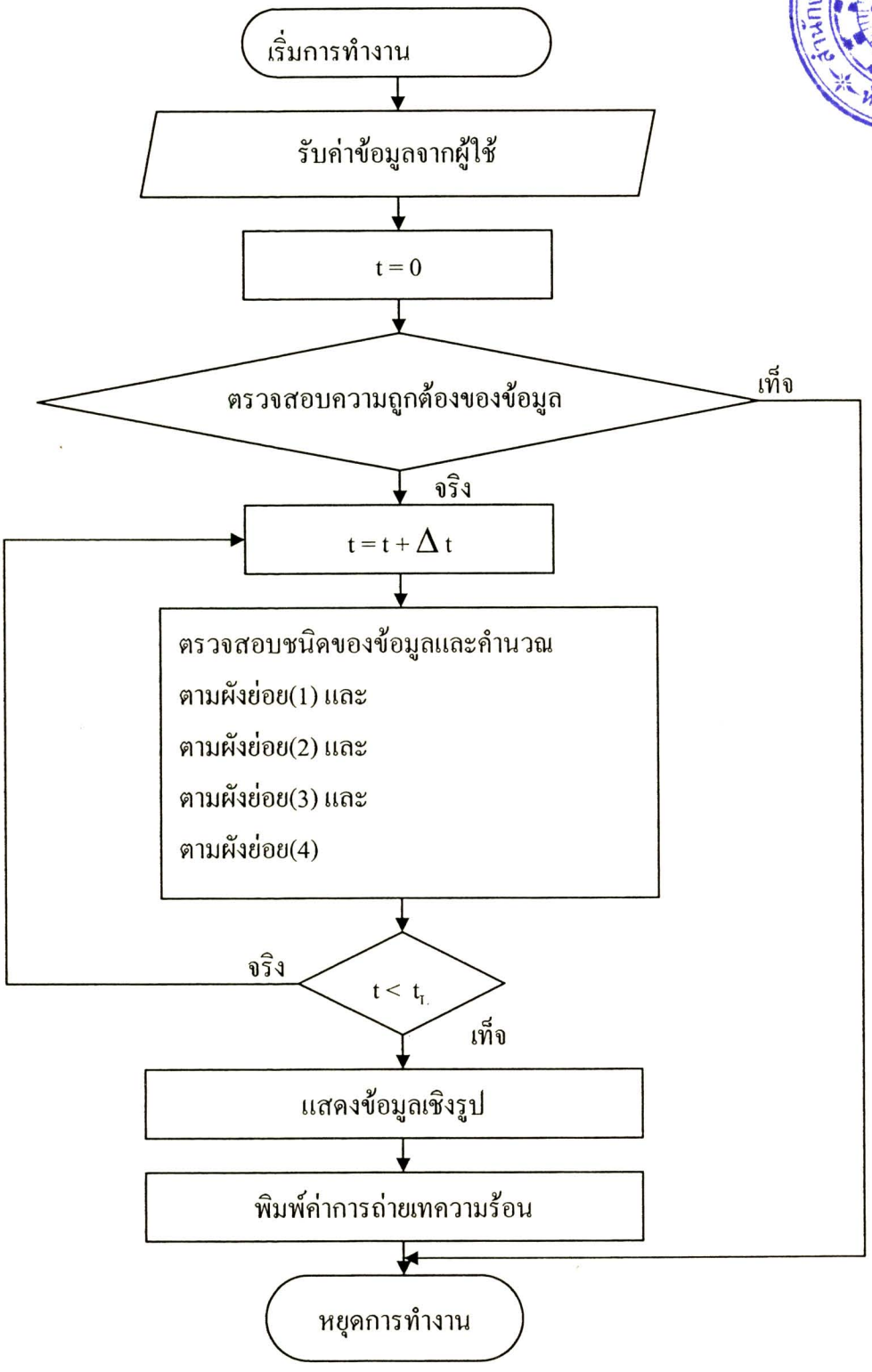
- มวลของเหลวและฟองไอ ในเวลาเริ่มต้นสามารถคำนวณได้โดยง่ายจากค่าความหนาแน่นของฟองไอและของเหลวที่สภาวะอิ่มตัว
- คำนวณการเปลี่ยนแปลงของมวลฟองไอ เนื่องมาจากการควบแน่นหรือการระเหย

- มวลฟองไอที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลทำให้มวลฟองไอ และมวลของเหลวที่อยู่ติดกันเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ามวลฟองไอและมวลของเหลวที่เวลาเปลี่ยนไปได้

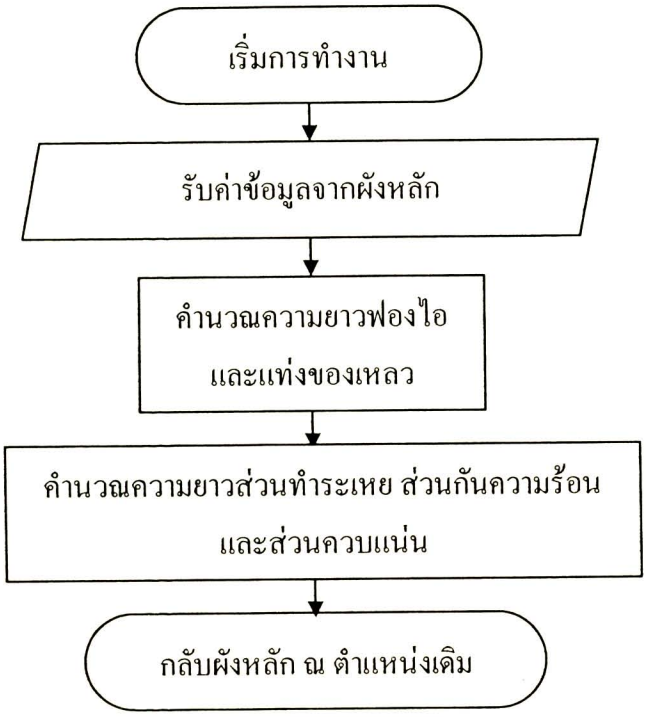
4.6.1.5 ผังย่อย (4) ผังย่อยนี้จะคำนวณทางด้านแท่งของเหลว ซึ่งการคำนวณจะซับซ้อนกว่าของฟองไอ ก่อนการคำนวณจะต้องกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ของก้อนของเหลว ซึ่งหากแบ่งจำนวนละเอียดมากก็จะได้ค่าที่แม่นยำ แต่เวลาในการคำนวณจะนาน ดังนั้นหากไม่ต้องการค่าที่แม่นยำมากนัก ก็ไม่จำเป็นต้องแบ่งละเอียดนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.8 รายละเอียดโปรแกรมประกอบด้วย

- การคำนวณหาอุณหภูมิผนังท่อของแท่งของเหลว เนื่องจากแท่งของเหลวจะเคลื่อนที่ไปมา ดังนั้นจำเป็นต้องหาค่าอุณหภูมิที่ผนังท่อ ซึ่งจะคำนวณหาตามแต่ละเอลิเมนต์ของเหลวเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนต่อไป
- คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ก้อนของเหลว ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสามช่วง คือ ช่วงราบเรียบ ช่วงแปรเปลี่ยน และช่วงปั่นป่วน
- จากอุณหภูมิผนังท่อและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้ สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิของเอลิเมนต์ของเหลวที่เปลี่ยนไปจากสมการพลังงาน ซึ่งอยู่ในรูปสมการ ODE และใช้วิธีการแก้สมการแบบ Implicit Finite Difference
- คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามความแตกต่างของอุณหภูมิ คือการถ่ายเทความร้อนเข้า หรือออกจากแท่งของเหลว

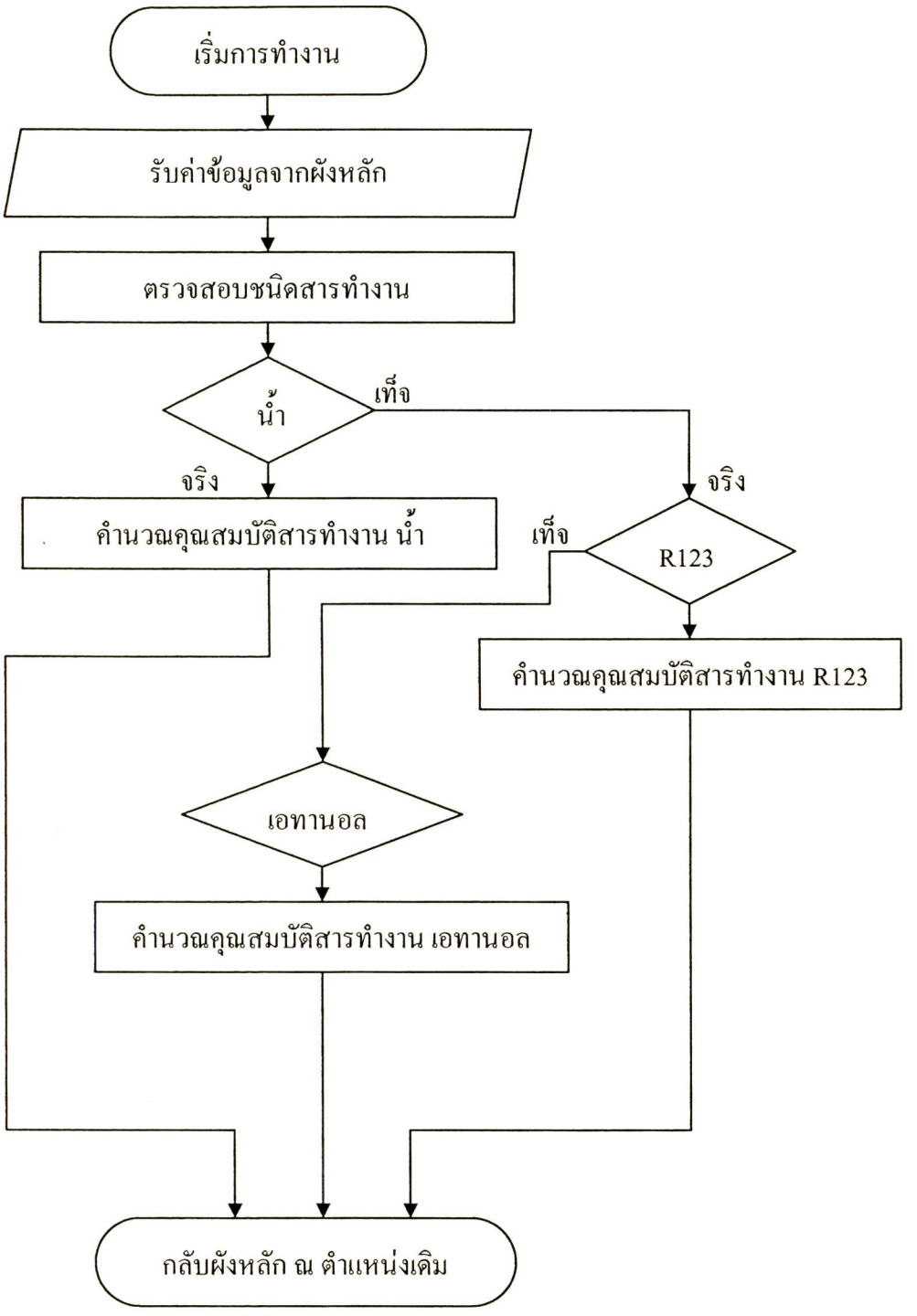
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



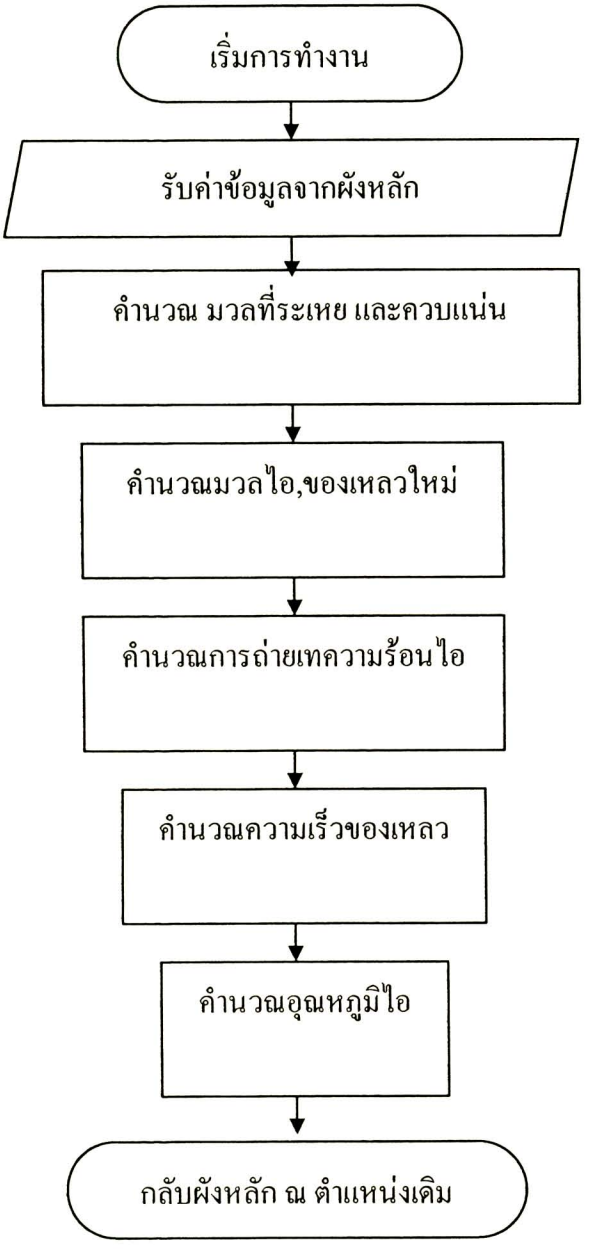
รูปที่ 4.4 ผังหลักของโปรแกรม



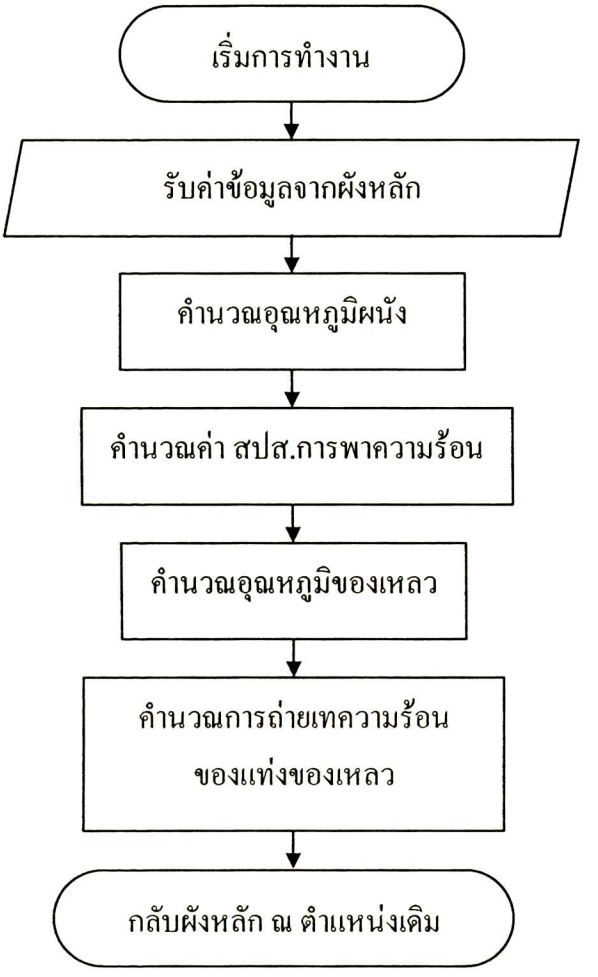
รูปที่ 4.5 ผังย่อย (1) การคำนวณความยาวฟองไอ แท่งของเหลว ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น



รูปที่ 4.6 ผังย่อย (2) การคำนวณค่าคุณสมบัติสารทำงาน



รูปที่ 4.7 ผังย่อย (3) การคำนวณมวล ความเร็วของเหลว อุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนฟองไอ



รูปที่ 4.8 ผังย่อย (4) การคำนวณอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนของแท่งของเหลว

4.7 หลักการทำงาน

4.7.1 เมื่อเรียกโปรแกรมหลัก ชื่อ Math_Model_PHP ผู้ใช้จะต้องป้อนข้อมูลที่ต้องการคำนวณ เช่น สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน สัดส่วนความยาว ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น ส่วนกันความร้อน (ถ้ามี) จำนวนโค้งเลี้ยว สัดส่วนการเติมสารทำงาน อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน แหล่งระบายความร้อน ชนิดสารทำงาน มุมเอียงการทำงาน และเวลาการใช้งานท่อความร้อน เมื่อทำการป้อนข้อมูลแล้ว โปรแกรมจะทำการตรวจสอบความสอดคล้องของชนิดสารทำงานและชนิดของท่อความร้อน หากไม่ถูกต้องโปรแกรมจะหยุดการคำนวณและแจ้งเตือนผู้ใช้

4.7.2 จากข้อมูลที่ป้อนสู่โปรแกรมหลัก Math_Model_PHP จะทำการสุ่มหาความยาวแท่งของเหลว (L_l) และความยาวฟองไอ (L_v) จากโปรแกรมย่อย Tube_Position_B โดยเทียบจากสัดส่วนการเติมสารทำงาน (F) ความยาวที่คำนวณจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1 ความยาวฟองไอและแท่งของเหลวเนื่องจากสารทำงาน (LF) ซึ่งจะประกอบด้วยความยาวแท่งของเหลว และความยาวฟองไอ สลับกันไป

2 ความยาวเนื่องจากโครงสร้าง (LT) ซึ่งจะประกอบด้วยความยาวส่วนทำระเหย (Le) ส่วนกันความร้อน (La) และส่วนระบายความร้อน (Lc) สลับกันไปเช่นกัน

4.7.3 ทำการเปรียบเทียบความยาวแตกต่างระหว่างความยาวเนื่องจากสารทำงานและความยาวเนื่องจากโครงสร้างที่แต่ละตำแหน่ง เพื่อหาความยาวแท่งของเหลวและฟองไอในแต่ละส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนระบายความร้อน เมื่อนิยามสถานที่ที่สารทำงานแต่ละชนิดอยู่ได้แล้วจะง่ายต่อการนิยามทิศทางการถ่ายเทความร้อน

4.7.4 ตรวจสอบชนิดของสารทำงานเพื่อทำการหาค่าคุณสมบัติสารทำงานตามชนิดสารทำงานที่เลือก ซึ่งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสารทำงาน 3 ชนิด คือ เอทานอล R123 และน้ำ โดยสารทำงานทั้งสาม จะแยกการคำนวณออกเป็น 3 สถานะ คือ สถานะของเหลวแบบแท่ง ของเหลวแบบฟิล์ม และก๊าซ หากผู้ใช้ต้องการคำนวณสารทำงานชนิดอื่น สามารถทำได้ง่ายโดยการเพิ่มโปรแกรมย่อยหาค่าคุณสมบัติสารทำงานนั้นๆ เพิ่มเข้าไป

4.7.5 จากคุณสมบัติสารทำงาน ความยาวฟองไอและแท่งของเหลวที่ได้ คำนวณหามวลฟองไอ (m_l) มวลแท่งของเหลว (m_v) มวลฟิล์มของเหลว (m_f) และมวลเนื่องจากความสูงแตกต่างของแท่งของเหลวภายในโค้งเลี้ยว (m_{3u})

4.7.6 คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมวลไอเนื่องจากการระเหย (m5) และการควบแน่น (m6) จากสมการสมดุลความร้อน และคำนวณหามวลฟองไอที่เวลาถัดไป

4.7.7 คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงแท่งของเหลวเนื่องจากการไหลเข้าและออกแบบฟิล์ม จากสมการโมเมนตัม และคำนวณหามวลแท่งของเหลวที่เวลาถัดไป

4.7.8 คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมวลฟิล์มของเหลวเนื่องจากการระเหย (m5) และการควบแน่น (m6) จากสมการสมดุลความร้อนฟิล์มของเหลว และคำนวณหามวลฟิล์มของเหลวที่เวลาถัดไป

4.7.9 หาคุณสมบัติสารทำงานที่อุณหภูมิฟองไอ เพื่อคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหย (Q_V_out) และการควบแน่น (Q_V_in)

4.7.10 จากอุณหภูมิที่ทุกๆ เอลิเมนต์ คำนวณหาค่าคุณสมบัติสารทำงาน เพื่อคำนวณหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งจะสามารถแบ่งรูปแบบการไหลออกเป็น 2 ชนิด คือ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดจะแตกต่างกัน

4.7.11 ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดที่ได้คำนวณหาค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่

4.7.12 คำนวณหาความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลว (V4) จากสมการโมเมนตัม ซึ่งประกอบด้วยความดันฟองไอ (P1) มวลเนื่องจากความสูงแตกต่าง และความเค้นเฉือนที่ผนัง (Tao)

4.7.13 จากความเร็วของเหลวที่ได้ส่งผลให้ตำแหน่งปลายของฟองไอเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจะคำนวณหาตำแหน่งปลายของฟองไอใหม่ (X6, X8) เพื่อหาปริมาตรของฟองไอ และปริมาตรที่เปลี่ยนไปนี้ส่งผลให้อุณหภูมิฟองไอเปลี่ยนไป (T2) และความดันใหม่ที่ได้ (P2) จะคำนวณจากความสัมพันธ์ของก๊าซอุดมคติ

4.7.14 อุณหภูมิฟองไอที่ได้ เป็นเงื่อนไขที่ขอบเพื่อทำการคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิ ซึ่งคำนวณได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในก้อนของเหลว โดยสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามรูปแบบการไหล คือ การไหลแบบราบเรียบ การไหลแบบช่วงแปรเปลี่ยน และการไหลแบบปั่นป่วน

4.7.15 แก้สมการพลังงานโดยวิธี Implicit Finite Difference โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในก้อนของเหลว และอุณหภูมิที่ผนัง

4.7.16 คำนวณหาการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากแท่งของเหลว

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

4.7.17 ตรวจสอบเงื่อนไขและสมมุติฐานที่ตั้งไว้ของโปรแกรม อาทิเช่นความถี่ที่ต้องเกิดการเดือด ละทิ้งแท่งของเหลวหรือฟองไอที่เล็กมากๆ (1μm) การสะสมแท่งของเหวที่โค้งลี้ยวด้านล่าง ซึ่งเมื่อรอบการคำนวณมาถึงเงื่อนไขดังกล่าวโปรแกรมย่อยต่างๆ จะรับข้อมูลและประมวลผลส่งต่อโปรแกรมหลักต่อไป

4.7.18 เปรียบเทียบจำนวนรอบที่ต้องคำนวณ หากไม่ครบตามจำนวนเวลาที่ต้องการคำนวณ ทำการแทนค่า อุณหภูมิ ความดัน ความเร็ว ตำแหน่งฟองไอและแท่งของเหลวใหม่ และคำนวณซ้ำจนเวลาครบตามที่กำหนด

4.7.19 แสดงผลการคำนวณโดยแสดงในรูปกราฟเทียบกับเวลา และค่าการถ่ายเทความร้อน พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลที่คำนวณได้เก็บไว้ใน Hard disk

เนื่องจากจะต้องมีการเรียกใช้ซ้ำโปรแกรมย่อยเดียวกันหลายครั้ง ดังนั้นเพื่อให้สะดวกในการตรวจสอบและความกะทัดรัดในตัวโปรแกรม จึงได้เขียนเป็นโปรแกรมย่อยต่างๆ หลายโปรแกรม และเพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมจึงได้เลือกใช้แม็ทแล็บเป็นภาษาในการเขียนและสามารถอธิบายรายละเอียดโปรแกรมได้ ดังนี้

4.8 รายละเอียดโปรแกรม

4.8.1 โปรแกรมชื่อ ETHANOL_L โปรแกรมนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติสารทำงาน เอทานอล ที่สภาวะของเหลวอิ่มตัว อันประกอบด้วย ความดันอิ่มตัว ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความหนืดจลน์ ความจุความร้อน ความตึงผิว และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

4.8.2 โปรแกรมชื่อ ETHANOL_V โปรแกรมนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติสารทำงานเอทานอล ที่สภาวะไออิ่มตัว อันประกอบด้วย ความดันอิ่มตัว ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความหนืดจลน์ ความจุความร้อน และความตึงผิว

4.8.3 โปรแกรมชื่อ H2O_L โปรแกรมนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติสารทำงาน น้ำที่สภาวะของเหลวอิ่มตัว อันประกอบด้วย ความดันอิ่มตัว ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความหนืดจลน์ ความจุความร้อน ความตึงผิว และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

4.8.4 โปรแกรมชื่อ H2O_V โปรแกรมนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติสารทำงาน น้ำที่สภาวะไออิ่มตัว อันประกอบด้วย ความดันอิ่มตัว ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความหนืดจลน์ ความจุความร้อน และความตึงผิว

4.8.5 โปรแกรมชื่อ R123_L โปรแกรมนี้จะใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติสารทำงาน R123ที่สภาวะของเหลวอิ่มตัว อันประกอบด้วย ความดันอิ่มตัว ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความหนืดจลน์ ความจุความร้อน ความตึงผิว และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

4.8.6 โปรแกรมชื่อ R123_V โปรแกรมนี้จะใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติสารทำงาน R123ที่สภาวะไออิ่มตัว อันประกอบด้วย ความดันอิ่มตัว ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ความหนืดจลน์ ความจุความร้อน และความตึงผิว

4.8.7 โปรแกรมชื่อ Tube_Position_B โปรแกรมย่อยนี้ ใช้ในการคำนวณความยาวเริ่มต้นของฟองไอ แท่งของเหลว โดยวิธีการสุ่มความยาวสอดคล้องกับสัดส่วนการเติมสารทำงานที่กำหนดไว้ รับข้อมูลทางด้านเรขาคณิตของท่อความร้อนแบบสั่นที่ใช้ในการจำลองการทำงาน และสัดส่วนการเติมสารทำงาน โปรแกรมย่อยนี้จะเรียกโปรแกรมย่อยอีกอันเพื่อทำการสุ่มความยาวฟองไอและแท่งของเหลวต่างๆ จนกว่าอัตราส่วนรวมแท่งของเหลวทั้งหมดต่อผลรวมแท่งของเหลวและฟองไอสอดคล้องกับสัดส่วนการเติมที่กำหนดไว้ ท้ายที่สุดโปรแกรมจะแสดง ข้อมูลทางด้านกายภาพของสารทำงานในท่อความร้อนแบบสั่น ซึ่งข้อมูลนี้จะแสดงจำนวนและความยาวของแต่ละแท่งของเหลว ฟองไอ

4.8.8 โปรแกรมชื่อ Definition position ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งและขนาดความยาวของทุกฟองไอ ของเหลว ในส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น โดยการคำนวณหาค่าความยาวต่างๆ นี้ จะคำนวณจากข้อมูลที่รับเข้ามา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- รับข้อมูลทางด้านเรขาคณิตของท่อความร้อนแบบสั่น อันได้แก่ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นซึ่งข้อมูลนี้จะมีค่าคงที่ตลอดช่วงการคำนวณ รับข้อมูลทางด้านกายภาพของสารทำงานใน ท่อความร้อนแบบสั่น ซึ่งข้อมูลที่รับเข้ามานี้จะแสดงจำนวนและความยาวของแต่ละแท่งของเหลว ฟองไอ โดยจำนวนข้อมูลและขนาดของแต่ละข้อมูลจะเปลี่ยนแปลง แตกต่างกันไป

- ผลลัพธ์ของโปรแกรมย่อยนี้จะแสดงผลการคำนวณต่างๆ ดังนี้

แสดงตำแหน่งของแต่ละแท่งของเหลว ฟองไอ ว่าอยู่ที่ส่วนใดของท่อความร้อน (ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน หรือส่วนควบแน่น)

แสดงค่าระยะห่างของขอบฟองไอทุกฟองไอเทียบจากพิกัดเริ่มต้น (มีค่าเท่ากับ 0 ที่ปลายปิดด้านซ้าย) ของท่อความร้อนแบบสั่น

แสดงการเปรียบเทียบทิศทางแรงเนื่องจากน้ำหนัก (หรือทิศทางแรง g) แรงเนื่องจากแรงตึงผิวกับพิกัดเริ่มต้นของท่อความร้อนแบบสั่น

ตรวจสอบที่โค้งเลี้ยวด้านล่างว่าประกอบด้วยฟองไอหรือแท่งของเหลว เพื่อเป็นเงื่อนไขในการคำนวณการสะสมของของเหลวที่โค้งเลี้ยวเนื่องจากการไหลลงของฟิล์มควบแน่น

4.8.9 โปรแกรมชื่อ Caltime โปรแกรมนี้ใช้ในการคำนวณเวลาโดยประมาณที่โปรแกรมต้องการใช้ เพื่อป้องกันปัญหาการคำนวณโปรแกรมที่นานเกินไป โดยจะมีการแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ และต้องได้รับการยืนยันจากผู้ใช้อีกครั้งจึงสามารถคำนวณต่อไปได้

4.8.10 โปรแกรมชื่อ Nu_liquid โปรแกรมนี้จะคำนวณทางด้านแท่งของเหลว ซึ่งการคำนวณจะซับซ้อนกว่าของฟองไอ ก่อนการคำนวณจะต้องกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ของก้อนของเหลว จำนวนละเอียดที่มากก็จะได้ผลการคำนวณที่แม่นยำ รายละเอียดโปรแกรมประกอบด้วย

- รับข้อมูลจากโปรแกรมหลัก ดังนี้ อุณหภูมิและ ความยาวแท่งของเหลวในแต่ละส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่น อุณหภูมิและความเร็วในแต่ละเอลิเมนต์แท่งขเองเหลว รวมทั้งอุณหภูมิฟองที่หน้าสัมผัสแท่งของเหลวฟองไอ

- โปรแกรมจะคำนวณหาค่า Re เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ก้อนของเหลว ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสามช่วง คือ ช่วงราบเรียบ ช่วงแปรเปลี่ยน และช่วงปั่นป่วน จากอุณหภูมิผนังท่อและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่คำนวณได้ แก้สมการพลังงานโดยวิธี Implicit Finite Difference ได้ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ของแท่งของเหลวที่เปลี่ยนไป และคำนวณค่าการส่งถ่ายความร้อนของแต่ละเอลิเมนต์แท่งของเหลว หาผลรวมค่าการถ่ายเทความ

ร้อนตามทิศทางการส่งถ่ายความร้อน (เข้าหรือออกจากแท่งของเหลว) ท้ายสุดนำค่าอุณหภูมิในแต่ละเอลิเมนต์แท่งของเหลว และค่าการส่งถ่ายความร้อนเข้าและออกจากแท่งของเหลวกลับคืนสู่โปรแกรมหลัก

4.8.11 โปรแกรมชื่อ Math_Model_PHP โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมหลักในการทำนายลักษณะทางกายภาพของท่อความร้อน เมื่อเรียกโปรแกรมนี้จะมีการป้อนข้อมูลที่ต้องการทำนายหาค่าการถ่ายเทความร้อน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จำนวนโค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย เป็นต้น โดยโปรแกรมนี้จะเชื่อมต่อกับโปรแกรมอื่น ๆ ข้างต้น ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ต้องการ ส่วนสารทำงานที่ใช้ประกอบด้วย 3 ชนิด คือ เอทานอล R123 และน้ำ เมื่อกระบวนการคำนวณเสร็จสิ้นโปรแกรมนี้จะแสดงข้อมูลที่คำนวณเสร็จต่อผู้ใช้ ในลักษณะกราฟของตำแหน่ง ความดัน อุณหภูมิ และค่าการส่งถ่ายความร้อน มีการบันทึกข้อมูลต่างๆอัตโนมัติ

4.8.12 โปรแกรมชื่อ FillPosition เป็นโปรแกรมย่อยที่ช่วยในการแสดงผลตำแหน่งของแท่งของเหลว ฟองไอ ในท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด โปรแกรมนี้มีประโยชน์มากในการแสดงผลการคำนวณเกี่ยวกับตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของสารทำงานในท่อความร้อนแบบสั่น รับข้อมูลทางด้านเรขาคณิตและข้อมูลทางด้านกายภาพของสารทำงานในท่อความร้อนแบบสั่น โปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบหาตำแหน่งของฟองไอและแท่งของเหลวที่แท้จริงในท่อความร้อนแบบสั่น ผลลัพธ์ที่ได้ของโปรแกรมนี้จะแสดงเป็นรูปภาพ ซึ่งเป็นการระบายตำแหน่งของฟองไอ (โปร่งใส) และแท่งของเหลว (สีฟ้า) ในท่อความร้อนแบบสั่นตามขนาดที่รับเข้ามาในโปรแกรมย่อยนี้

นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมย่อยอื่นๆ ที่ใช้สนับสนุนการคำนวณอันได้แก่ โปรแกรมย่อยที่คำนวณเวลาโดยประมาณที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณของโปรแกรมเพื่อแจ้งเตือนและรอการยืนยันจากผู้ใช้ว่ายังคงต้องการคำนวณอยู่ หรือโปรแกรมตรวจสอบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากความผิดพลาดสะสม หรือโปรแกรมช่วยบันทึกการคำนวณอัตโนมัติเพื่อป้องกันปัญหาไฟฟ้าขัดข้องระหว่างการคำนวณ และโปรแกรมเรียกข้อมูลที่บันทึกไว้แล้วนั้นมาคำนวณต่อ