สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของโครงสร้างหล่อเย็นด้วยการพาความร้อน

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในบทที่ 3 สามารถนำมาใช้ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาการวิเคราะห์อุณหภูมิของโครงสร้างหล่อเย็นด้วยการพาความร้อน โปรแกรมดังกล่าวถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN) โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้มีชื่อว่า Nodeless FE รายละเอียดของโปรแกรมดังกล่าวได้ถูกอธิบายโดยละเอียดดังนี้

4.1 ขั้นตอนการคำนวณ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Nodeless FE ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (main program) และโปรแกรมย่อย (subroutine) ต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

4.1.1 อ่านแฟ้มข้อมูลนำเข้า (input file) ของปัญหา ซึ่งประกอบด้วย

- ลักษณะของปัญหาสถานะอยู่ตัว (steady state) หรือสถานะชั่วครู่ (transient)
- เลือกระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบธรรมดาหรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตัวแปรไร้จุดต่อที่ใช้หาผลลัพธ์
- เลือกวิธีการแก้ระบบสมการด้วยการกำจัดแบบเกาส์ (Guass elimination method) หรือคอนจูเกตเกรเดียนท์ (conjugate gradient method)
- เลือกวิธีการจัดระบบสมการ θ สำหรับปัญหาสถานะชั่วครู่ โดย $0 \le \theta \le 1$ เช่น หากกำหนดให้ θ เท่ากับ 0.5 ระบบสมการจะจัดตามวิธีของแครงก์-นิโคสัน (Crank-Nicolson)
- ช่วงเวลา เวลาที่หยุดการคำนวณและจำนวนครั้งที่คำนวณต่อการบันทึกผลลัพธ์หนึ่งครั้งสำหรับปัญหาสถานะชั่วครู่
- คุณสมบัติของของไหล ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะและค่าความหนาแน่น
- คุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวของกับของไหล ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดการไหล อัตราการไหล ปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง ปริมาณความร้อนที่กระทำจากภายนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อน เส้นขอบเปียกและอุณหภูมิภายนอก

- ข้อมูลของเอลิเมนต์ของของไหลได้แก่ หมายเลขเอลิเมนต์ หมายเลขของจุดต่อที่อยู่บนเอลิเมนต์นั้น ๆ และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์นั้น ๆ ได้แก่ การผลิตความร้อนได้เอง ความร้อนที่กระทำจากภายนอกและการพาความร้อน
- คุณสมบัติของของแข็ง ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะและค่าความหนาแน่น
- คุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวของกับของแข็ง ได้แก่ ความหนา ปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง ปริมาณความร้อนที่กระทำจากภายนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและอุณหภูมิภายนอก
- ข้อมูลของเอลิเมนต์ของของแข็ง ได้แก่ หมายเลขเอลิเมนต์ หมายเลขของจุดต่อที่อยู่บนเอลิเมนต์นั้น ๆ และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์นั้น ๆ ได้แก่ การผลิตความร้อนได้เอง ความร้อนที่กระทำจากภายนอกและการพาความร้อน
- ข้อมูลของเอลิเมนต์ที่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนระหว่างของไหลกับของแข็ง ได้แก่ จำนวนเอลิเมนต์ ตัวเลขแสดงหมายเลขเอลิเมนต์และจุดต่อบนเอลิเมนต์นั้น ๆ
- ข้อมูลของจุดต่อ ได้แก่ หมายเลขของจุดต่อ พิกัดของจุดต่อ เงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิและค่าอุณหภูมิบนจุดต่อนั้น ๆ

4.1.2 สร้างตัวแปรไร้จุดต่อบนเอลิเมนต์ของของไหลและของแข็งด้วยโปรแกรมย่อย (cre_nod_F) และ (cre_nod_S) ตามลำดับ

4.1.3 สร้างไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์ของไหลและของแข็งจากนั้นทำการประกอบเมตริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์เข้ากับระบบสมการรวมด้วยโปรแกรมย่อย (setmatF) สำหรับเอลิเมนต์ของของไหล (setmatS) สำหรับเอลิเมนต์ของของแข็งและ (setmatFS) สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนระหว่างของไหลกับของแข็ง

4.1.4 จัดรูประบบสมการตามวิธีจัดการ θ ที่เลือกไว้สำหรับปัญหาสถานะชั่วครู่ด้วยโปรแกรมย่อย (manmat)

4.1.5 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตด้วยโปรแกรมย่อย (applyBC) และแก้ระบบสมการด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์ด้วยโปรแกรมย่อย (guass) หรือคอนจูเกตเกรเดียนท์ด้วยโปรแกรมย่อย (unsympcg)

4.1.6 พิมพ์ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ลงในไฟล์ผลลัพธ์เพื่อนำไปใช้แสดงผลด้วยโปรแกรมย่อย (printout)

ลำดับขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมสามารถสรุปได้โดยใช้แผนภูมิการทำงาน (flow chart) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

4.2 รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

รายละเอียดต่าง ๆ ของโปแกรม Nodeless FE ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

4.3 รายละเอียดของไฟล์ข้อมูลนำเข้า

รายละเอียดของไฟล์ข้อมูลนำเข้าที่ใช้กับโปรแกรม Nodeless FE ประกอบไปด้วย 5 ส่วนย่อยดังต่อไปนี้

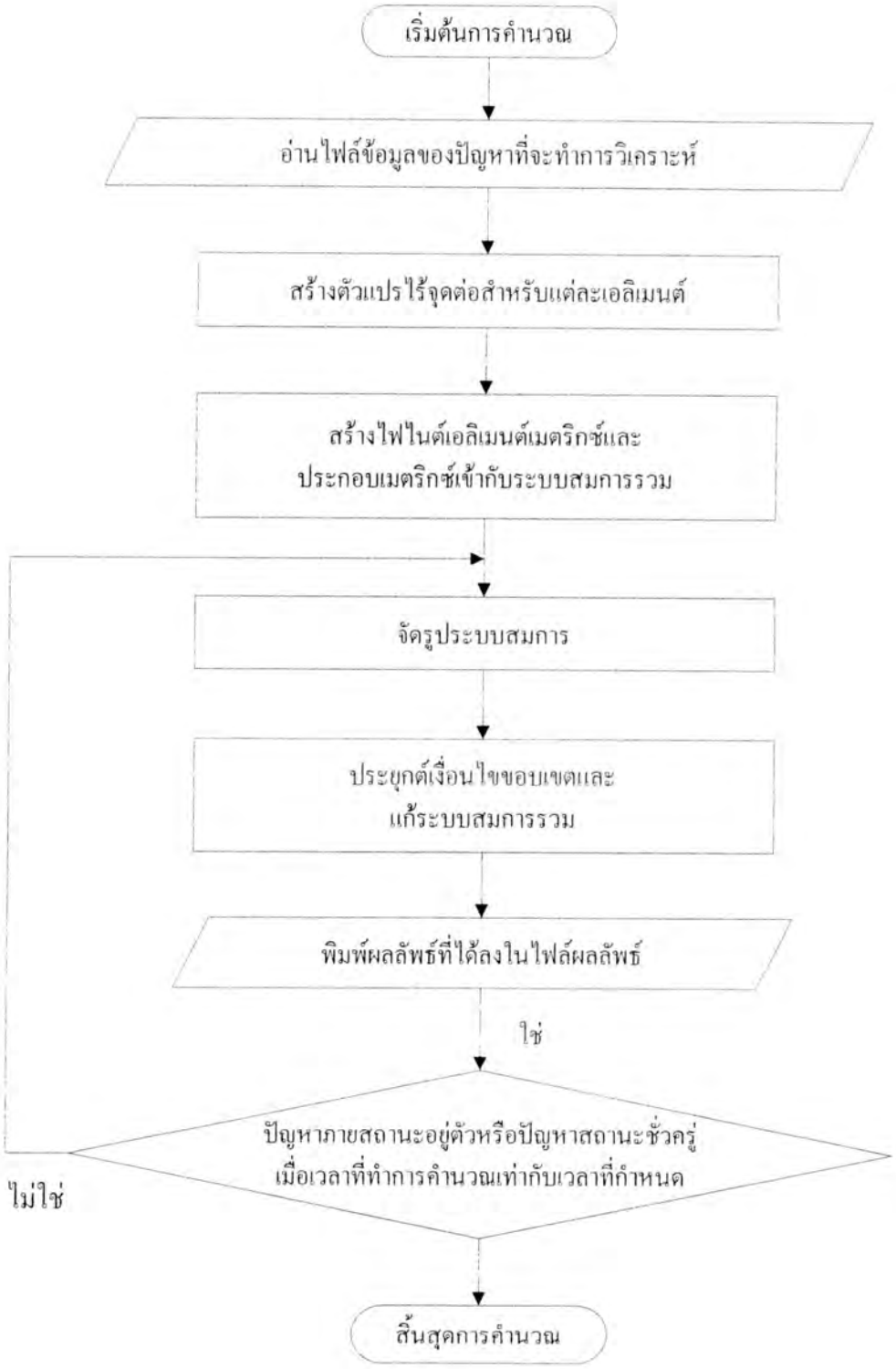
ส่วนที่ 1 ลักษณะของไฟล์ข้อมูล

บรรทัดแรก	จำนวนบรรทัดที่อธิบายลักษณะปัญหา
บรรทัดต่อ ๆ ไป	ลักษณะของปัญหาซึ่งมีจำนวนบรรทัดเท่ากับที่ระบุไว้ในบรรทัดแรก

ตัวอย่างเช่น:

```
2
Finite element data for
thermal entry length problem
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Nodeless FE

ส่วนที่ 2 ลักษณะของปัญหาและวิธีการหาผลลัพธ์

บรรทัดแรก	คำระบุลักษณะของปัญหา ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการแก้ระบบสมการ
บรรทัดที่ 2	ตัวเลขระบุลักษณะของปัญหา ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการแก้ระบบสมการ
บรรทัดที่ 3	คำระบุวิธีการจัดระบบสมการ ช่วงเวลา เวลาที่หยุดการคำนวณและจำนวนครั้งที่คำนวณต่อการบันทึกผลลัพธ์หนึ่งครั้งสำหรับปัญหาสถานะชั่วครู่
บรรทัดที่ 4	ตัวเลขคำระบุวิธีการจัดระบบสมการ ช่วงเวลา เวลาที่หยุดการคำนวณและจำนวนครั้งที่คำนวณต่อการบันทึกผลลัพธ์หนึ่งครั้งสำหรับปัญหาสถานะชั่วครู่

ตัวอย่างเช่น:

ana	FE	sol
0	1	1
zeta	dt	time
0.0	0.0	0.0

หมายเหตุ:

ana = 0 กำหนดให้เป็นปัญหาสถานะอยู่ตัว

ana = 1 กำหนดให้เป็นปัญหาสถานะชั่วครู่

FE = 0 กำหนดให้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบธรรมดา

FE = 1 กำหนดให้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตัวแปรไร้จุดต่อ

sol = 0 กำหนดให้ใช้วิธีการแก้ระบบสมการด้วยการกำจัดแบบเกาส์

sol = 1 กำหนดให้ใช้วิธีการแก้ระบบสมการด้วยคอนจูเกตเกรเดียน

zeta มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1

ส่วนที่ 3 ข้อมูลของของไหล

บรรทัดแรก	คำอธิบายชุดข้อมูลของของไหล
บรรทัดที่ 2	คำระบุคุณสมบัติต่าง ๆ
บรรทัดที่ 3	ตัวเลขแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะและความหนาแน่น
บรรทัดที่ 4	คำระบุคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวของกับของไหล

บรรทัดที่ 5 ตัวเลขแสดงพื้นที่หน้าตัดการไหล อัตราการไหล ปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง ปริมาณความร้อนที่กระทำจากภายนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อน เส้นขอบเปียกและอุณหภูมิภายนอก

บรรทัดที่ 6 คำระบุจำนวนเอลิเมนต์

บรรทัดที่ 7 ตัวเลขแสดงจำนวนเอลิเมนต์

บรรทัดที่ 8 คำระบุลักษณะของเอลิเมนต์ จุดต่อในเอลิเมนต์นั้น ๆ และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์นั้น ๆ

บรรทัดต่อ ๆ ไป ตัวเลขแสดงหมายเลขเอลิเมนต์ หมายเลขจุดต่อทั้งสองที่ประกอบขึ้นเป็นเอลิเมนต์นั้น ๆ และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์นั้น ๆ

ตัวอย่างเช่น:

----------Fluid data----------

cond	spec	dens				
10.0	25000.0	1.0				
area	flow	Qgen	Qspec	h	p	Tsurr
0.1	0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nele						
50						
ID	I	J	L1	L2	L3	
1	358	359	0	0	0	
2	359	360	0	0	0	
.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	
49	406	407	0	0	0	
50	407	408	0	0	0	

หมายเหตุ:

I คือจุดต่อที่เป็นทางเข้าของของไหล

J คือจุดต่อที่เป็นทางออกของของไหล

L1 = 0 ไม่มีการผลิตความร้อนได้เอง

L1 = 1 มีการผลิตความร้อนได้เอง

L2 = 0 ไม่มีความร้อนที่กระทำจากภายนอก

L2 = 1 มีความร้อนที่กระทำจากภายนอก

L3 = 0 ไม่มีการพาความร้อน

L3 = 1 มีการพาความร้อน

ส่วนที่ 4 ข้อมูลของของแข็ง

บรรทัดแรก คำอธิบายชุดข้อมูลของของแข็ง

บรรทัดที่ 2 คำระบุคุณสมบัติของของแข็ง

บรรทัดที่ 3 ตัวเลขแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น

บรรทัดที่ 4 คำระบุคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวของกับของแข็ง

บรรทัดที่ 5 ตัวเลขแสดงความหนา ปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง ปริมาณความร้อนที่กระทำจากภายนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อน และอุณหภูมิภายนอก

บรรทัดที่ 6 คำระบุจำนวนเอลิเมนต์

บรรทัดที่ 7 ตัวเลขแสดงจำนวนเอลิเมนต์

บรรทัดที่ 8 คำระบุลักษณะของเอลิเมนต์

บรรทัดต่อ ๆ ไป ตัวเลขแสดงหมายเลขเอลิเมนต์ หมายเลขจุดต่อทั้งสามในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่ประกอบขึ้นเป็นเอลิเมนต์นั้น ๆ และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์นั้น ๆ

ตัวอย่างเช่น:

```
----------Solid data----------
cond        spec        dens
1000.0      500.0       8000.0
thick       Qgen        Qspec       h           Tsurr
1.0         0.0         8000.0      0.0         0.0
nele
600
ID          I           J           K           L1          L2          L3

1           1           113         112         0           0           0
2           1           2           113         0           0           0
.           .           .           .           .           .           .
.           .           .           .           .           .           .
.           .           .           .           .           .           .
599         357         57          58          0           2           0
600         357         56          57          0           0           0
```

หมายเหตุ:

L1 = 0 ไม่มีการผลิตความร้อนได้เอง

L1 = 1 มีการผลิตความร้อนได้เอง

L2 = 0 ไม่มีความร้อนที่กระทำจากภายนอก

L2 = 1 มีความร้อนที่ขอบระหว่างจุดต่อ I กับ J

L2 = 2 มีความร้อนที่ขอบระหว่างจุดต่อ J กับ K

L2 = 3 มีความร้อนที่ขอบระหว่างจุดต่อ I กับ K

L2 = 4 มีความร้อนที่กระทำจากภายนอกบนผิวของเอลิเมนต์

L3 = 0 ไม่มีการพาความร้อนที่กระทำจากภายนอก

L3 = 1 มีการพาความร้อนที่ขอบระหว่างจุดต่อ I กับ J

L3 = 2 มีการพาความร้อนที่ขอบระหว่างจุดต่อ J กับ K

L3 = 3 มีการพาความร้อนที่ขอบระหว่างจุดต่อ I กับ K

L3 = 4 มีการพาความร้อนที่กระทำจากภายนอกบนผิวของเอลิเมนต์

ส่วนที่ 5 ข้อมูลของจุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ของของไหลและของแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน

บรรทัดแรก คำอธิบายข้อมูลของจุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ของของไหลและของแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน

บรรทัดที่ 2 คำระบุจำนวนเอลิเมนต์

บรรทัดที่ 3 ตัวเลขแสดงจำนวนเอลิเมนต์

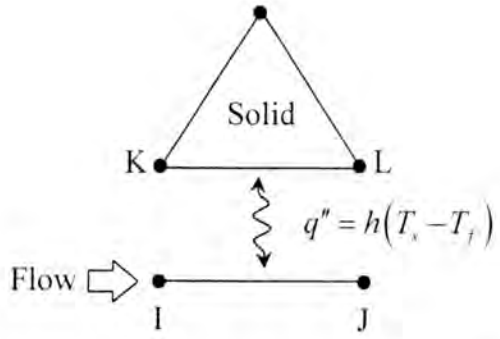
บรรทัดที่ 4 คำระบุลักษณะของเอลิเมนต์

บรรทัดที่ 5 ตัวเลขแสดงหมายเลขเอลิเมนต์ หมายเลขจุดต่อทั้งสี่ที่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนระหว่างจุดต่อของของไหล I และ J กับจุดต่อของของแข็ง K กับ L ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ตัวอย่างเช่น: ----------Fluid-Solid data----------

nele
50

ID	I	J	K	L	h
1	358	359	1	2	2.075E+03
2	359	360	2	3	1.17906E+03
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
49	406	407	49	50	2.798E+02
50	407	408	50	51	2.783E+02



รูปที่ 4.2 ลักษณะการวางตัวของจุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ของของไหล
และของแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน

ส่วนที่ 6 ข้อมูลของจุดต่อ

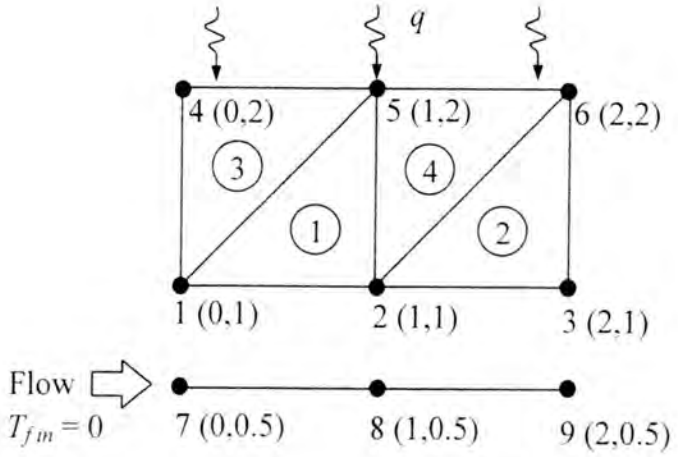
บรรทัดแรก	คำอธิบายข้อมูลของจุดต่อ
บรรทัดที่ 2	คำระบุจำนวนจุดต่อ
บรรทัดที่ 3	ตัวเลขแสดงจำนวนจุดต่อ
บรรทัดที่ 4	คำระบุลักษณะของจุดต่อ
บรรทัดที่ 5	ตัวเลขแสดงหมายเลขจุดต่อ ตำแหน่งจุดต่อในแกน x และ y เงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิและค่าอุณหภูมิ

ตัวอย่างเช่น: ----------Node data----------

npoin
408

ID	x	y	IBC	T
1	.000000E+00	.100000E+00	0	25.0
2	.277034E-01	.100000E+00	0	25.0
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
407	0.194459E+01	0.500000E-01	0	25.0
408	0.200000E+01	0.500000E-01	0	25.0

เพื่อเป็นการทำความเข้าใจวิธีการสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจะแสดงการสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าจากตัวอย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นปัญหาแผ่นโลหะที่ได้รับฟลักซ์ความร้อนตลอดขอบบนและที่ขอบด้านล่างมีของไหลไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน กำหนดให้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหานี้มีค่าเท่ากับหนึ่งทั้งหมด



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างปัญหาในการสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้า

โดยมีรายละเอียดของไฟล์ข้อมูลนำเข้าสำหรับปัญหาดังกล่าวดังนี้

```
2
Finite element data for
convectively-cooled solid
ana     FE      sol
0       1       1
zeta    dt      time    nsave
0.0     0.0     0.0     0
------------------------------Fluid data------------------------------
cond    spec    dens
1.0     1.0     1.0
area    flow    Qgen    Qspec   h       p       Tsurr
1.0     1.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0
nele
2
ID      I       J       L1      L2      L3
1       7       8       0       0       0
2       8       9       0       0       0
------------------------------Solid data------------------------------
cond    spec    dens
1.0     1.0     1.0
thick   Qgen    Qspec   h       Tsurr
1.0     0.0     1.0     0.0     0.0
nele
4
ID      I       J       K       L1      L2      L3
1       1       2       5       0       0       0
2       2       3       6       0       0       0
3       5       4       1       0       1       0
4       6       5       2       0       1       0
--------------------------Fluid-Solid data--------------------------
nele
2
ID      I       J       K       L       h
```

1	7	8	1	2	1.0
2	8	9	2	3	1.0

----------Node data----------

npoin
9

ID	x	y	IBC	T
1	0.0	1.0	0	0.0
2	1.0	1.0	0	0.0
3	2.0	1.0	0	0.0
4	0.0	2.0	0	0.0
5	1.0	2.0	0	0.0
6	2.0	2.0	0	0.0
7	0.0	0.5	1	0.0
8	1.0	0.5	0	0.0
9	2.0	0.5	0	0.0

รายละเอียดของไฟล์ข้อมูลออกสำหรับปัญหาดังคือ

FE	1		
zeta	0.50	dt	0.10000000E+00
F element	2	S element	4
actual node	9	nodeless variable	11
step	1		
time	0.10000000E+00		

node	T
1	0.14600261E+01
2	0.16903459E+01
3	0.18329650E+01
4	0.26044100E+01
5	0.26702903E+01
6	0.27361706E+01
7	0.00000000E+00
8	0.74065644E+00
9	0.10428091E+01

4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้แสดงถึงรายละเอียดต่าง ๆ ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า Nodeless FE ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของโครงสร้างหล่อเย็นด้วยการพาความร้อน โดยเริ่มจากอธิบายถึงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อยต่าง ๆ รายละเอียดของไฟล์ข้อมูลนำเข้า รวมถึงแสดงปัญหาตัวอย่างในการสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าและรายละเอียดของไฟล์ข้อมูลออก เพื่อให้ผู้ที่ใช้โปรแกรมนี้เกิดความเข้าใจและสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าได้อย่างถูกต้องได้มากยิ่งขึ้น โดยโปรแกรม Nodeless FE นี้สามารถวิเคราะห์ปัญหาภายใต้สถานะอยู่ตัวและสถานะชั่วครู่ของปัญหาการถ่ายเทความร้อนในของไหล การถ่ายเทความร้อนในของแข็งและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับของแข็ง ในบทถัดไปจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม Nodeless FE กับปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบต่าง ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความถูกต้อง