บทที่ 7

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแบ่งเอลิเมนต์และหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนท้ายของบทที่ 6 ถึงขั้นตอนในทางปฏิบัติในการนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบหนืดอย่างคร่าว ๆ ในตอนต้นของบทนี้จะขอกล่าวถึงขั้นตอนต่าง ๆ ของการใช้โปรแกรมของระเบียบวิธีทั้งสองดังกล่าวร่วมกันเพื่อให้เห็นภาพรวมของการวิเคราะห์ปัญหา ก่อนที่จะลงไปในรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแบ่งเอลิเมนต์และหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบหนืด ประกอบไปด้วย 3 โปรแกรม ดังนี้

1. โปรแกรมที่ใช้สำหรับแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ

โปรแกรมที่ใช้สำหรับแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ คือ โปรแกรม 'BUILT.FOR' รายละเอียดของโปรแกรมดังกล่าวขอกล่าวไว้ในหัวข้อ 7.1

2. โปรแกรมสำหรับคำนวณหาขนาดเอลิเมนต์

โปรแกรมสำหรับคำนวณหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมตามตำแหน่งต่าง ๆ ของรูปปัญหา คือ โปรแกรม 'SPACE.FOR' ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนของการปรับขนาดเอลิเมนต์ (remeshing) รายละเอียดของหลักการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมตามตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหาได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะของกล่าวไว้ในหัวข้อ 7.3

3. โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบหนืด

โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบหนืดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ โปรแกรม 'NV.F' เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าคำตอบพื้นฐาน ซึ่งก็คือ ค่าของความเร็วในทิศทางแกน x และ y และค่าของความดันที่จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ ซึ่งหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5

ลำดับขั้นตอนของการใช้โปรแกรมทั้งสามดังกล่าวมีลำดับขั้นตอนหลัก ๆ อยู่ 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์ปัญหาในช่วงที่ยังไม่ได้นำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาใช้ ขั้นตอนดังกล่าวประกอบด้วยขันตอนย่อย ๆ ดังนี้

1.1 แบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ โดยใช้โปรแกรม BUILT.FOR โดยจะแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่มีขนาดสม่ำเสมอตลอดทั้งโดเมนปัญหา

1.2 นำปัญหาดังกล่าวไปวิเคราะห์หาคำตอบพื้นฐานที่จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม NV.F

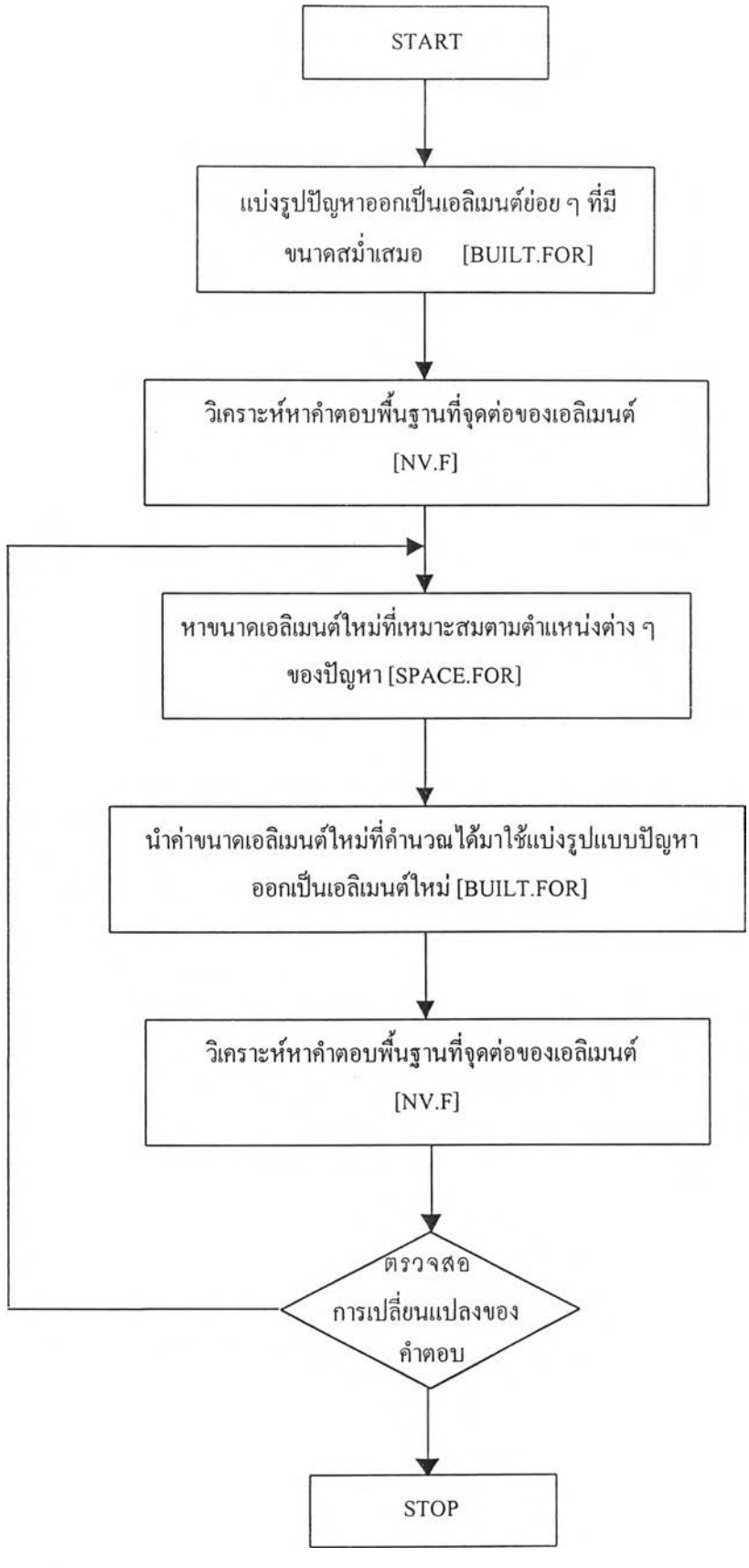
ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนของการวิเคราะห์ปัญหาในช่วงที่นำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาใช้ ขั้นตอนดังกล่าวประกอบด้วยขันตอนย่อย ๆ ดังนี้

2.1 เมื่อได้คำตอบพื้นฐานที่จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์แล้ว จากขั้นตอนที่ 1.2 สำหรับการทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งแรก หรือจากขั้นตอนที่ 2.3 สำหรับการทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ $i, i = 1, 2, 3, \ldots$ นำคำตอบดังกล่าวที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการพิจารณาปรับขนาดเอลิเมนต์ ในที่นี้ คือ ความเร็ว (V) มาใช้คำนวณหาขนาดเอลิเมนต์โดยเฉลี่ยที่เหมาะสม (h) ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหา โดยใช้โปรแกรม SPACE.FOR

2.2 นำค่าขนาดเอลิเมนต์โดยเฉลี่ยที่เหมาะสมตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 2.1 มาใช้ในการแบ่งรูปปัญหาเดิมใหม่ โดยใช้โปรแกรม BUILT.FOR

2.3 นำปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ใหม่นี้ไปวิเคราะห์หาคำตอบพื้นฐานที่จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม NV.F

2.4 นำคำตอบที่ได้ในขั้นตอนที่ 2.3 มาพล็อตเปรียบเทียบกับคำตอบครั้งก่อนหน้าหนึ่งครั้ง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของคำตอบ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของคำตอบมาก ให้กลับไปทำในขั้นตอนที่ 2.1, 2.2, 2.3 ตามลำดับอีกครั้ง แต่ถ้าคำตอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงว่าการปรับขนาดเอลิเมนต์ใหม่ในครั้งดังกล่าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคำตอบ ซึ่งหมายถึงว่า ถ้าจะปรับขนาดเอลิเมนต์ให้เล็กลงอีกเท่าไรก็ตามจะไม่ทำให้คำตอบมีความแม่นยำมากขึ้น จึงหยุดการคำนวณ และถือว่าคำตอบสุดท้ายเป็นคำตอบที่ถูกต้อง



รูปที่ 7.1 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบหนืดโดยใช้เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดย อัตโนมัติร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

7.1 โปรแกรมสำหรับแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไปจะต้องแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ และในการแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ เราสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปมาใช้แบ่งได้ แต่ในการนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ปัญหานั้นเนื่องด้วยค่าขนาดของเอลิเมนต์จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของปัญหาตามความเหมาะสม ดังนั้นจะต้องมีโปรแกรมทางด้านกราฟฟิคมาใช้ช่วยในการแบ่งรูปปัญหาให้ได้ตามต้องการ ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้นำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลของของไหลแบบหนืดในงานวิศวกรรม ดังนั้นจึงได้นำเอาโปรแกรมกราฟฟิคสำหรับแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ที่มีอยู่แล้วมาใช้ช่วยในการแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ โปรแกรมกราฟฟิคดังกล่าว คือ โปรแกรม BUILT.FOR ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมอย่างคร่าว ๆ เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการโดยคราว ๆ และสามารถนำโปรแกรมดังกล่าวไปใช้ช่วยในการแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ได้

โปรแกรม BUILT ประกอบด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย 38 โปรแกรม ซึ่งสามารถแบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ ได้ 4 ส่วน ดังนี้

1. โปรแกรมหลัก (MAIN PROGRAM)
   เป็นส่วนหลักของโปรแกรม ทำหน้าที่เรียกใช้โปรแกรมย่อยต่าง ๆ ให้ทำงานตามลำดับ คือ อ่านข้อมูลจากแฟ้มข้อมูล สร้างจุดต่อของเอลิเมนต์ (node) และเอลิเมนต์ พร้อมทั้งแสดงผลลัพธ์ลงในแฟ้มต่าง ๆ ด้วย
2. ส่วน INPUT DATA
   เป็นส่วนที่ทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากแฟ้มข้อมูล ประกอบไปด้วย โปรแกรมย่อย INPUT หรับการทำในช่วงที่ยังไม่ได้นำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาใช้หรือในช่วงที่เรียกว่า inertial mesh และเพิ่มเติมด้วยโปรแกรมย่อย INPUTBG INPUTSG INPUTSF และ INPSP สำหรับการทำในช่วง ที่ใช้เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติหรือมีการปรับขนาดเอลิเมนต์ (remeshing)
3. ส่วนการสร้างจุดต่อของเอลิเมนต์และเอลิเมนต์
   เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สร้างจุดต่อของเอลิเมนต์และเอลิเมนต์บนรูปปัญหา ประกอบด้วย โปรแกรมย่อยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานในช่วงนี้จำนวนมาก โดยสามารถลำดับการทำงานได้ดังนี้

3.1 โปรแกรมย่อย GENIS

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สร้างจุดต่อของเอลิเมนต์ลงขอบต่าง ๆ ทุดขอบของปัญหา

3.2 โปรแกรมย่อย GENSF

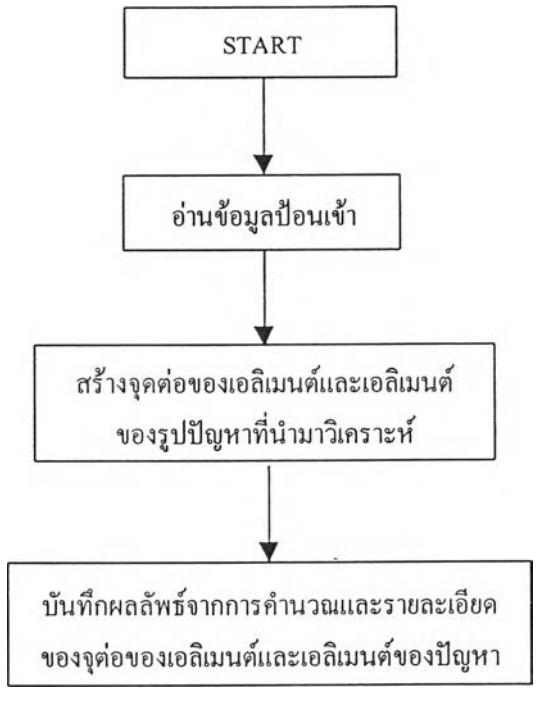
เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สร้างจุดต่อของเอลิเมนต์และเอลิเมนต์บนทุกพื้นผิวของรูปปัญหา โดยสร้างต่อจากจุดต่อของเอลิเมนต์ที่มีอยู่บนขอบ

3.3 โปรแกรมย่อย GLNUM

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รวมข้อมูลของจุดต่อของเอลิเมนต์ของปัญหา ก่อนที่จะนำไปแสดงผลลัพธ์

4. ส่วนแสดงผลลัพธ์

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แสดงผลลัพธ์จากการคำนวณลงในแฟ้มต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้แสดงผลบนโปรแกรมกราฟฟิคทั่วไป ประกอบไปด้วย โปรแกรมย่อย SIZE, CONDITION OUTBG, OUTSG, OUTSF และ DATAGRAPHIC



รูปที่ 7.2 ลำดับการทำงานของโปรแกรม BUILT.FOR

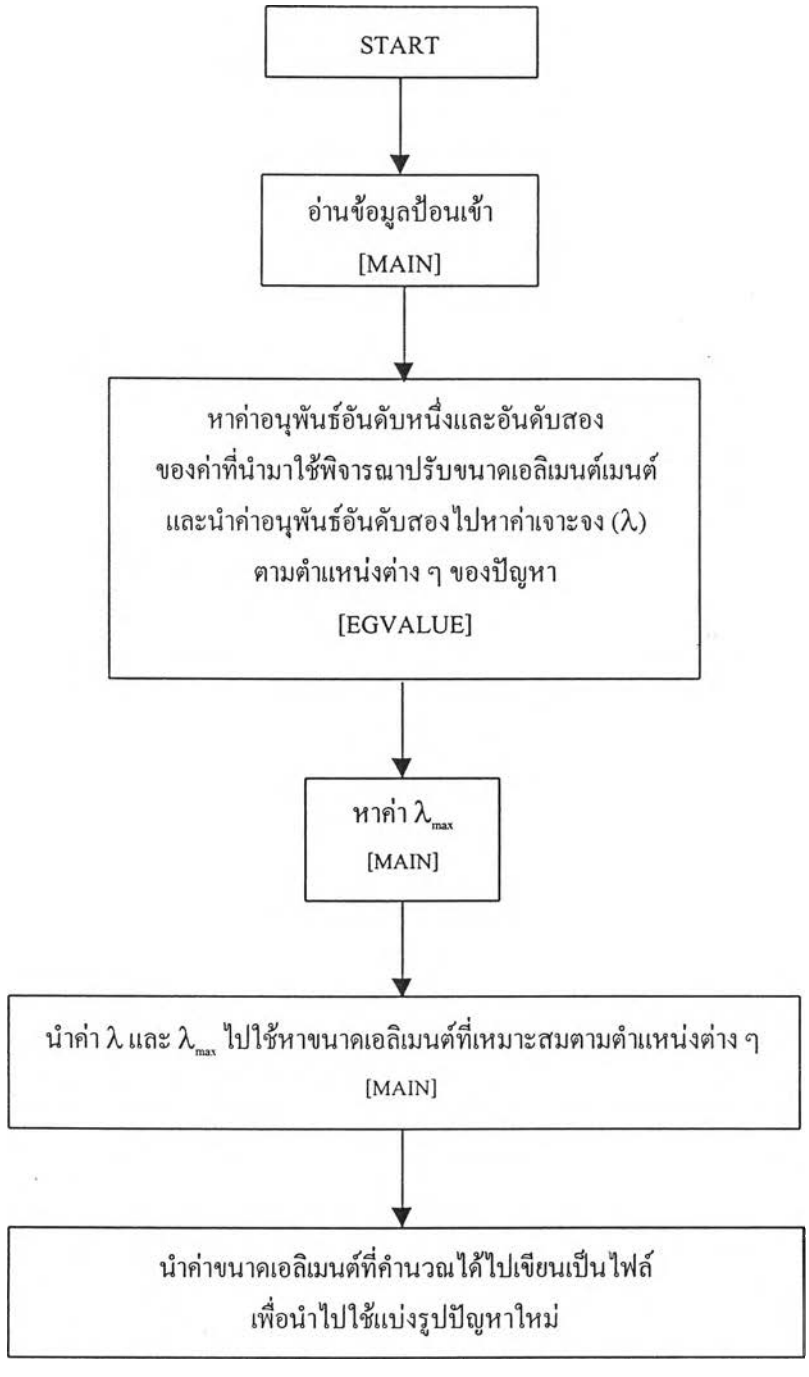
7.2 รายละเอียดของโปรแกรม BUILT

รายละเอียดของโปรแกรม BUILT.FOR แสดงไว้ใน ภาคผนวก ข.

7.3 โปรแกรมสำหรับคำนวณหาขนาดเอลิเมนต์

โปรแกรมสำหรับคำนวณหาขนาดเอลิเมนต์ คือ โปรแกรม SPACE.FOR ประกอบด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อยอีก 1 โปรแกรม ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดังนี้

1. อ่านค่าข้อมูลป้อนเข้า ซึ่งประกอบด้วย ชื่อปัญหา (problem name) ตัวเลขกำกับชุดปัญหา (version number) ข้อมูลรายละเอียดของโมเดลที่นำจะมาทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ใหม่ เช่น จำนวนจุดต่อหลัก (main node) จำนวนเอลิเมนต์ ค่าความเร็วที่จุดต่อหลัก ขนาดของโมเดลในแกน x และ แกน y ตำแหน่งของจุดต่อและลำดับการต่อของจุดต่อเพื่อให้เกิดเป็นเอลิเมนต์ ค่าขนาดเอลิเมนต์ใหญ่สุดที่ยอมให้ได้
2. หาค่าเจาะจง (eigen value : λ) ของแต่ละจุดต่อ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 โดยการเรียกใช้โปรแกรมย่อย EGVALUE โปรแกรมย่อย EGVALUE จะทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของค่าที่นำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการพิจารณาปรับขนาดเอลิเมนต์ ในที่นี้คือ หาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของความเร็วที่จุดต่อต่าง ๆ ดังกล่าวมาหาค่าในแกนหลัก (principal values) ซึ่งที่แต่ละจุดต่อจะมีค่าในแกนหลักเกิดขึ้นสองค่า ค่าที่มากที่สุดระหว่างสองค่าดังกล่าวจะถูกเลือกออกมา ค่าที่ถูกเลือกออกมานี้ จะถูกเรียกว่าเป็นค่าเจาะจง ของแต่ละจุดต่อหลัก
3. นำค่าเจาะจงของทุกจุดต่อหลักมาทำการเลือกค่าที่มากที่สุด ค่าดังกล่าวจะกำหนดให้เป็นค่า λ_{max} ของปัญหาดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 6
4. นำค่า λ และ λ_{max} ที่ได้ไปใช้หาค่าขนาดเอลิเมนต์ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหา โดยถ้าค่าขนาดเอลิเมนต์ (h) ตำแหน่งใดที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าขนาดเอลิเมนต์ที่ใหญ่ที่สุดที่กำหนดไว้ โปรแกรมจะทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ที่ตำแหน่งดังกล่าวให้เท่ากับค่าขนาดเอลเมนต์ใหญ่สุดที่กำหนดไว้
5. นำค่าขนาดเอลิเมนต์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่คำนวณได้ ไปเขียนเป็นไฟล์เพื่อนำไปใช้แบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ใหม่ต่อไปในโปรแกรม BUILT



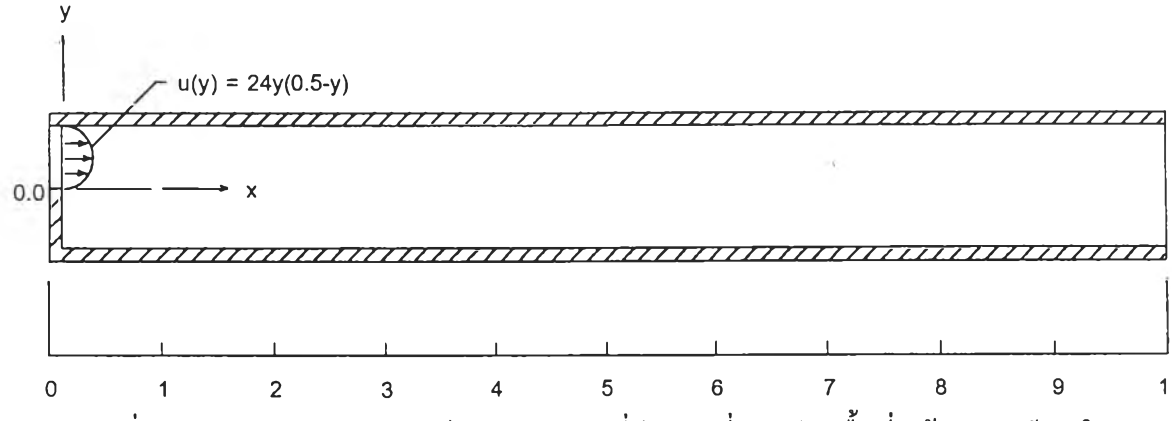
รูปที่ 7.3 ลำดับการทำงานของโปรแกรม SPACE.FOR

7.4 รายละเอียดของโปรแกรม SPACE

รายละเอียดของโปรแกรม SPACE แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

7.5 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมสำหรับสร้างและหาขนาดของเอลิเมนต์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการยกตัวอย่างการใช้โปรแกรม BUILT และโปรแกรม SPACE ตัวอย่างที่จะแสดงนี้เป็นตัวอย่างปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด ซึ่งจะใช้เป็นปัญหาที่แสดงความถูกต้องของการใช้เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป ลักษณะของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด [17] แสดงไว้ในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 ลักษณะของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด

สำหรับไฟล์ข้อมูลป้อนเข้าของโปรแกรม BUILT มีดังนี้

```
nis    nsf
 5     1
edge definition
 1     2
 0.    0.5    0.
 0.    0.     0.
 2     2
 0.    0.     0.
 0.   -0.5    0.
 3     2
 0.   -0.5    0.
10.   -0.5    0.
 4     2
10.   -0.5    0.
10.    0.5    0.
 5     2
10.    0.5    0.
 0.    0.5    0.
surface support point
```

```
 1      2      2
 0.    -0.5    0.
10.    -0.5    0.
 0.     0.5    0.
10.     0.5    0.
face boundary
 1     5
 1    2    3    4    5
```

ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ข้อมูลแสดงจำนวนขอบและพื้นผิวของปัญหา

```
nis    nsf
 5      1
```

บรรทัดที่ 1 คำอธิบายจำนวนขอบ (edge) และจำนวนพื้นผิว (surface) ของรูปปัญหา

บรรทัดที่ 2 จำนวนขอบและจำนวนพื้นผิวของรูปปัญหา โดยปัญหานี้ประกอบด้วย 5 ขอบและ 1 พื้นผิว

2. ข้อมูลคำจำกัดความของขอบปัญหา

```
edge definition
 1      2
 0.     0.5     0.
 0.     0.      0.
```

บรรทัดที่ 1 คำอธิบายคำจำกัดความของขอบของปัญหา

บรรทัดที่ 2 หมายเลขขอบและ จำนวนจุดต่อที่ทำให้เกิดขอบของปัญหา

บรรทัดที่ 3 ค่าโคออดิเนตของจุดต่อที่ทำให้เกิดขอบของปัญหา

บรรทัดที่ 4 ค่าโคออดิเนตของจุดต่อที่ทำให้เกิดขอบของปัญหา

3. ข้อมูลจุดต่อที่มุมที่รองรับพื้นผิวทั้งหมดของปัญหา

```
surface support point
 1      2      2
 0.    -0.5    0.
10.    -0.5    0.
 0.     0.5    0.
10.     0.5    0.
```

บรรทัดที่ 1 คำอธิบายจุดต่อที่มุมที่รองรับพื้นผิวของปัญหา

บรรทัดที่ 2 ค่าโคออดิเนตของจุดต่อที่มุมล่างซ้ายของพื้นผิวของปัญหา

บรรทัดที่ 3 ค่าโคออดิเนตของจุดต่อที่มุมล่างขวาของพื้นผิวของปัญหา

บรรทัดที่ 4 ค่าโคออดิเนตของจุดต่อที่มุมบนซ้ายของพื้นผิวของปัญหา

บรรทัดที่ 5 ค่าโคออดิเนตของจุดต่อที่มุมบนขวาของพื้นผิวของปัญหา

4. ข้อมูลการเรียงลำดับของขอบเพื่อให้เกิดเป็นพื้นผิวของปัญหา

face boundary

1 5

1 2 3 4 5

บรรทัดที่ 1 คำอธิบายลำดับของขอบเพื่อให้เกิดเป็นพื้นผิวของปัญหา

บรรทัดที่ 2 ลำดับตัวเลขของขอบเพื่อให้เกิดเป็นพื้นผิวของปัญหา

การแสดงหน้าจอในการใช้โปรแกรม BUILT สำหรับการสร้าง initial mesh มีดังนี้

```
    ******************************
    ***        B U I L T       ***
    ***    surface triangulator ***
    ***  for built-up structures ***
    ******************************

*** mesh generation ***
  0.- initial mesh
  1.- remeshing

    Option ?:  0
Enter problem name: bearing
Enter current version number: 0

*** initial mesh ***
  element size ?: 0.125
facet > reading surface definition data

*** generating edge no:  1

  generated points:     5

*** generating edge no:  2

  generated points:     5

*** generating edge no:  3

  generated points:    84

*** generating edge no:  4

  generated points:     9

*** generating edge no:  5

  generated points:    84
nelem =   20 npoin =  198 nsfr =  193
nelem =   40 npoin =  218 nsfr =  213
nelem =   60 npoin =  238 nsfr =  233
nelem =   80 npoin =  258 nsfr =  253
nelem =  100 npoin =  278 nsfr =  273
                .
                .
                .
nelem = 1400 npoin =  837 nsfr =  157
nelem = 1420 npoin =  837 nsfr =  135
```

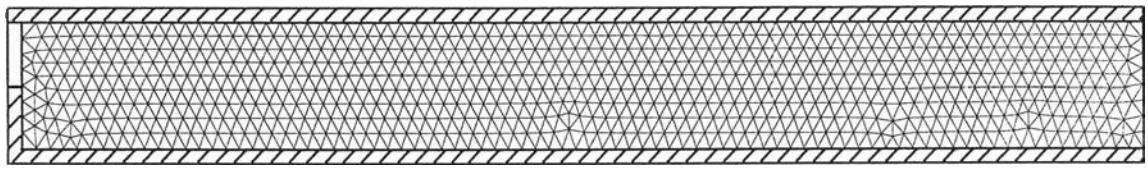
```
 nelem =  1440 npoin =   837 nsfr =   103
 nelem =  1460 npoin =   837 nsfr =    63
 nelem =  1480 npoin =   837 nsfr =    23
 *** nr. of 3"s removed =         0
   2 sides have been swapped
   0 sides have been swapped
   0 sides have been swapped
   0 sides have been swapped
 the checking has been succesful !!!!
total number of generated points :  837
total number of generated elements : 1490

 facet > writing surface triangulation

 facet > writing face information

total number of generated points :  837
 total number of generated elements : 1490
 total number of generated boundaries :  182
 total number of generated sides : 2326
        5        5
        5       10
       84       94
        9      103
       84      187
```

หลังจากการใช้โปรแกรม BUILT เพื่อสร้าง initial mesh ซึ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอ จะได้รูปปัญหาออกมาดังรูปที่ 7.5 ซึ่งประกอบด้วย 1,490 เอลิเมนต์



รูปที่ 7.5 ลักษณะการแบ่งรูปปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดออก เป็นเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอ

เมื่อได้แบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ดังรูปที่ 7.5 แล้ว นำปัญหาดังกล่าวไปสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าสำหรับโปรแกรม NV เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป ซึ่งลักษณะไฟล์ข้อมูลนำเข้าสำหรับโปรแกรม NV ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 5 ดังนั้นจะไม่แสดงให้ดูในหัวข้อนี้

หลังจากที่นำเอาปัญหาการไหลดังรูปที่ 7.5 ไปวิเคราะห์หาคำตอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม NV เรียบร้อยแล้ว นำผลของคำตอบที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับการปรับ

ขนาดเอลิเมนต์ใหม่ ในที่นี้คือ ค่าของความเร็ว (V) ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 6 มาใช้หาขนาดเอลิเมนต์ใหม่โดยใช้โปรแกรม SPACE

ตัวอย่างไฟล์ขอมูลคำตอบที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับการปรับขนาดเอลิเมนต์ใหม่ ซึ่งใช้เป็นไฟล์ข้อมูลป้อนเข้าของโปรแกรม SPACE สำหรับตัวอย่างนี้มีดังนี้

```
837
  1  0.00000E+00
  2  0.00000E+00
  3  0.00000E+00
  4  0.00000E+00
  5  0.00000E+00
  6  0.11250E+01
  7  0.15000E+01
  8  0.11250E+01
  9  0.00000E+00
 10  0.00000E+00
  .        .
  .        .
  .        .
830  0.64507E+00
831  0.73037E+00
832  0.74771E+00
833  0.69265E+00
834  0.30696E+00
835  0.64484E+00
836  0.73215E+00
837  0.47990E+00
```

ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ข้อมูลจำนวนจุดต่อ

   837

   บรรทัดที่ 1 จำนวนจุดต่อ

2. ข้อมูลความเร็วที่จุดต่อต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการปรับขนาดเอลิเมนต์

   1 0.00000E+00

   บรรทัดที่ 1 ประกอบด้วยเลขจุดต่อ และค่าความเร็วที่จุดต่อ

การแสดงหน้าจอในการใช้โปรแกรม SPACE สำหรับการปรับขนาดเอลิเมนต์ มีดังนี้

```
CHECK INPUT FILES FOR  1. ?.N_
                       2. ?.L_
                       3. ?.DIM
                       4. ?.V_

 ENTER PROBLEM NAME : DUCT
 ENTER CURRENT VERSION NUMBER : 0
```

PLEASE INPUT THE MINIMUM & MAXIMUM SPACINGS

0.0625, 0.25

837

1	0.88353020E-01
2	0.81570971E-01
3	0.22757508E+00
4	0.22255568E+00
5	0.21582441E+00
6	0.69237320E-01
7	0.60000000E-01
8	0.91064339E-01
9	0.10241946E+00
10	0.24460840E+00
.	.
.	.
.	.
831	0.16964659E+00
832	0.16990343E+00
833	0.17220297E+00
834	0.19206250E+00
835	0.17147601E+00
836	0.16785522E+00
837	0.16626085E+00

ไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม SPACE มีลักษณะดังนี้

837

1	0.88353020E-01
2	0.81570971E-01
3	0.22757508E+00
4	0.22255568E+00
5	0.21582441E+00
6	0.69237320E-01
7	0.60000000E-01
8	0.91064339E-01
9	0.10241946E+00
10	0.24460840E+00
.	.
.	.
.	.
831	0.16964659E+00
832	0.16990343E+00
833	0.17220297E+00
834	0.19206250E+00
835	0.17147601E+00
836	0.16785522E+00
837	0.16626085E+00

ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ข้อมูลจำนวนจุดต่อ

   837

   บรรทัดที่ 1 จำนวนจุดต่อ

2. ข้อมูลขนาดของเอลิเมนต์โดยเฉลี่ยตามตำแหน่งต่าง ๆ ของจุดต่อ

1 0.00000E+00

บรรทัดที่ 1 ประกอบด้วยเลขจุดต่อ และค่าขนาดเอลิเมนตที่จุดต่อต่าง ๆ ค่าขนาดเอลิเมนต์ใหม่ที่ได้นี้จะนำไปเป็นข้อมูลป้อนเข้าของโปรแกรม BUILT สำหรับการสร้างเอลิเมนต์ใหม่

การแสดงหน้าจอในการใช้โปรแกรม BUILT สำหรับการสร้างเอลิเมนต์ใหม่ที่ได้ปรับขนาดเอลิเมนต์แล้ว

```
    ****************************
    ***       B U I L T      ***
    ***   surface triangulator   ***
    ***  for built-up structures  ***
    ****************************

*** mesh generation ***
  0.- initial mesh
  1.- remeshing

     Option ?:  1
Enter problem name: bearing
Enter current version number: 1
Enter previous version number: 0

 facet > reading surface definition data

 facet > reading previous triangulation

 facet > reading previous edge data

 facet > reading previous face data

 facet > reading new spacings data

 *** generating edge no:  1

    generated points:     8

 *** generating edge no:  2

    generated points:     4

 *** generating edge no:  3

    generated points:    44

 *** generating edge no:  4

    generated points:     7

 *** generating edge no:  5

    generated points:    46
```

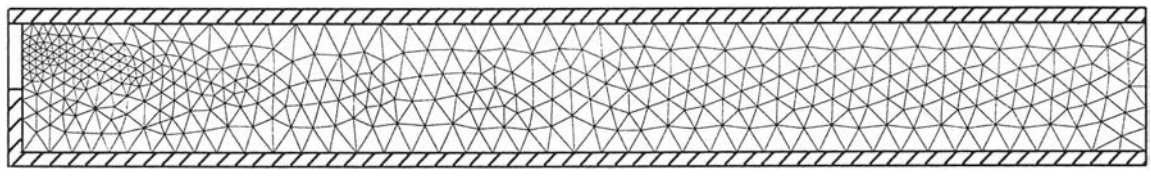
```
nelem =   20 npoin =  121 nsfr =  119
nelem =   40 npoin =  140 nsfr =  135
nelem =   60 npoin =  160 nsfr =  155
nelem =   80 npoin =  180 nsfr =  175
nelem =  100 npoin =  195 nsfr =  185
                .
                .
                .
nelem =  700 npoin =  439 nsfr =  117
nelem =  720 npoin =  442 nsfr =  103
nelem =  740 npoin =  442 nsfr =   77
nelem =  760 npoin =  442 nsfr =   39
nelem =  780 npoin =  443 nsfr =    3
*** nr. of 3"s removed =        0
  35 sides have been swapped
   3 sides have been swapped
   0 sides have been swapped
   4 sides have been swapped
   0 sides have been swapped
   1 sides have been swapped
   0 sides have been swapped
 the checking has been succesful !!!!
total number of generated points :  443
total number of generated elements :  780

 facet > writing surface triangulation

 facet > writing face information

total number of generated points :  443
total number of generated elements :  780
total number of generated boundaries :  104
total number of generated sides : 1222
       8       8
       4      12
      44      56
       7      63
      46     109
```

หลังจากการใช้โปรแกรม BUILT เพื่อแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ในขั้นตอนการปรับขนาดเอลิเมนต์ใหม่ จะทำให้ได้รูปปัญหาออกมาดังรูปที่ 7.6 ซึ่งประกอบด้วย 780 เอลิเมนต์

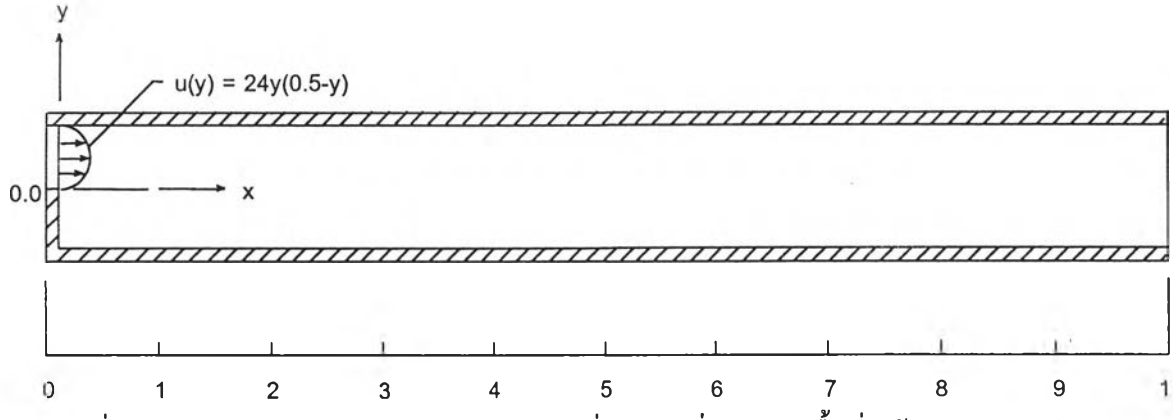


รูปที่ 7.6 ลักษณะการแบ่งรูปปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดออก เป็นเอลิเมนต์ที่มีการปรับขนาดเอลิเมนต์แล้ว

7.6 การตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบจากการนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

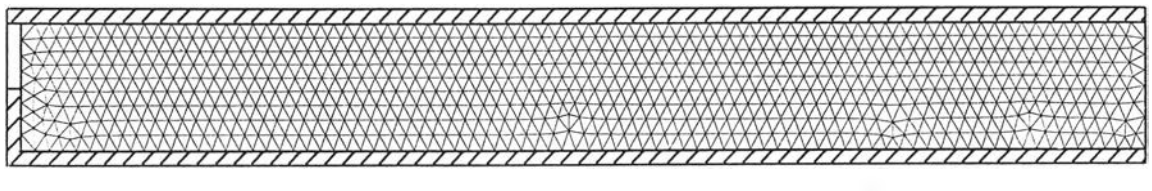
ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของคำตอบจากการนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แทนการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยจะแสดงไว้ในตัวอย่างปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับกรณีที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียวแต่มีการแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบละเอียด

ปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดที่นำมาพิจารณามีลักษณะของปัญหาดังในรูปที่ 7.7 ซึ่งเป็นปัญหาเดียวกับปัญหาที่ยกตัวอย่างในหัวข้อที่ 7.5

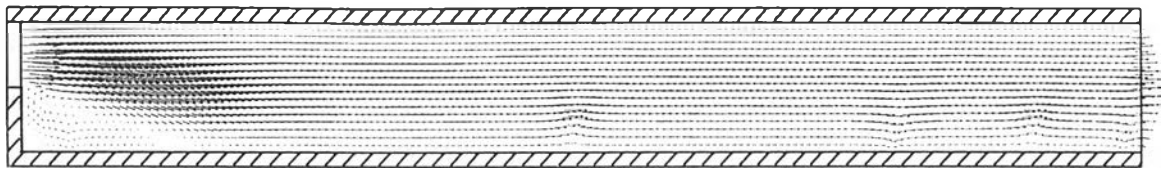


รูปที่ 7.7 ลักษณะของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด

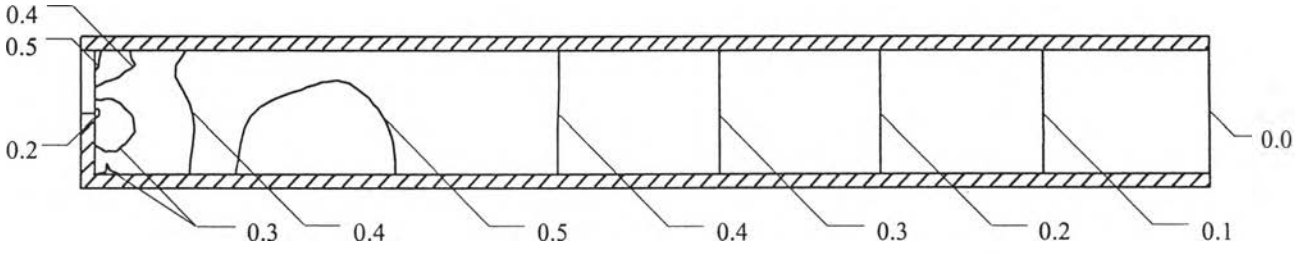
ปัญหาดังกล่าวเริ่มต้นจากการแบ่งรูปปัญหาที่มีขนาดเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอ ดังในรูปที่ 7.8 ซึ่งประกอบด้วย 1,490 เอลิเมนต์ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ผลเฉลยของความเร็วและความดันดังในรูปที่ 7.9 และรูปที่ 7.10 ตามลำดับ



รูปที่ 7.8 ลักษณะการแบ่งรูปปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดออกเป็นเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 7.9 ผลเฉลยความเร็วของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันที ทันใดกรณีที่มีการแบ่งเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 7.10 ผลเฉลยความดันของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันที ทันใดกรณีที่มีการแบ่งเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอ

หลังจากนั้นนำเอาผลเฉลยความเร็วที่ได้ไปใช้ในการคำนวณปรับขนาดเอลิเมนต์ใหม่ครั้งที่ 1 แล้วนำไปแบ่งรูปปัญหาออกมาดังรูปที่ 7.11 ซึ่งประกอบด้วย 780 เอลิเมนต์ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ผลเฉลยของความเร็วและความดันดังรูปที่ 7.12 และรูปที่ 7.13 ตามลำดับ ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลเฉลยความเร็วและความดันสำหรับกรณีที่มีการแบ่งเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอและกรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1 ที่ตำแหน่งเดียวกัน มีดังนี้

กรณีที่มีการแบ่งเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอ

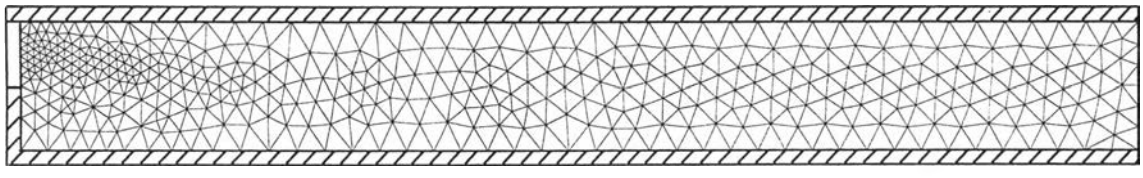
NODE	U-VELOCITY	V-VELOCITY	PRESSURE
1	9.463647E-01	-1.790969E-02	4.722556E-01
2	8.517573E-01	-4.828253E-02	4.326117E-01
3	8.482579E-01	-3.886856E-02	4.083264E-01
4	7.852648E-01	-4.085088E-02	3.954974E-01
5	1.428498E+00	-4.438039E-02	4.315645E-01
6	1.395619E+00	-7.730772E-02	4.051889E-01
7	1.348000E+00	-9.843900E-02	3.902896E-01
8	1.289386E+00	-1.104813E-01	3.834996E-01
9	1.432047E+00	-6.372731E-02	3.518958E-01
10	1.411390E+00	-1.082233E-01	3.475494E-01
11	1.392199E+00	-1.379766E-01	3.502222E-01
12	1.369936E+00	-1.573538E-01	3.553801E-01

กรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1

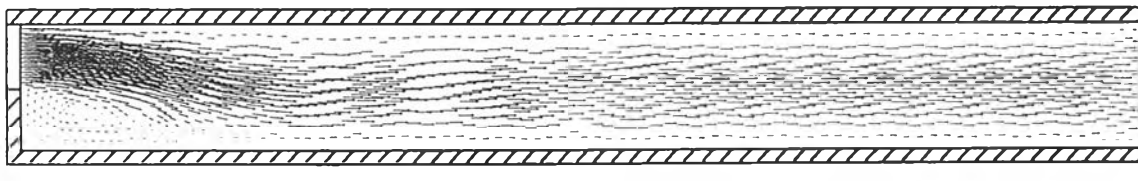
NODE	U-VELOCITY	V-VELOCITY	PRESSURE
1	9.476950E-01	-1.628219E-02	6.935600E-01
2	9.134734E-01	-2.830665E-02	6.284467E-01
3	8.659390E-01	-3.510151E-02	5.855954E-01
4	8.080537E-01	-3.768529E-02	5.618998E-01
5	1.430716E+00	-3.814098E-02	6.259970E-01
6	1.403796E+00	-6.787372E-02	5.773769E-01
7	1.364900E+00	-8.773470E-02	5.535020E-01
8	1.314122E+00	-9.942477E-02	5.422315E-01
9	1.432318E+00	-5.408108E-02	5.016242E-01
10	1.415570E+00	-9.330963E-02	4.858144E-01
11	1.399228E+00	-1.195118E-01	4.859065E-01
12	1.382508E+00	-1.375598E-01	4.922198E-01

13	9.524208E-01	-7.809360E-02	2.932325E-01	13	9.474778E-01	-6.551215E-02	3.809934E-01
14	9.701053E-01	-1.076917E-01	3.040005E-01	14	9.626412E-01	-9.276291E-02	4.068976E-01
15	1.006397E+00	-1.313570E-01	3.153896E-01	15	9.955428E-01	-1.119001E-01	4.271776E-01
16	1.044251E+00	-1.528539E-01	3.260543E-01	16	1.033256E+00	-1.297158E-01	4.436887E-01
17	2.231161E-01	-4.635792E-04	2.579876E-01	17	2.127897E-01	2.792601E-04	3.420678E-01
18	3.490137E-01	-2.822870E-02	2.839280E-01	18	3.332096E-01	-1.779739E-02	3.793283E-01
19	4.543713E-01	-5.909393E-02	2.986964E-01	19	4.351723E-01	-4.343917E-02	4.008266E-01
20	5.432979E-01	-8.814438E-02	3.101642E-01	20	5.161355E-01	-6.807536E-02	4.165500E-01

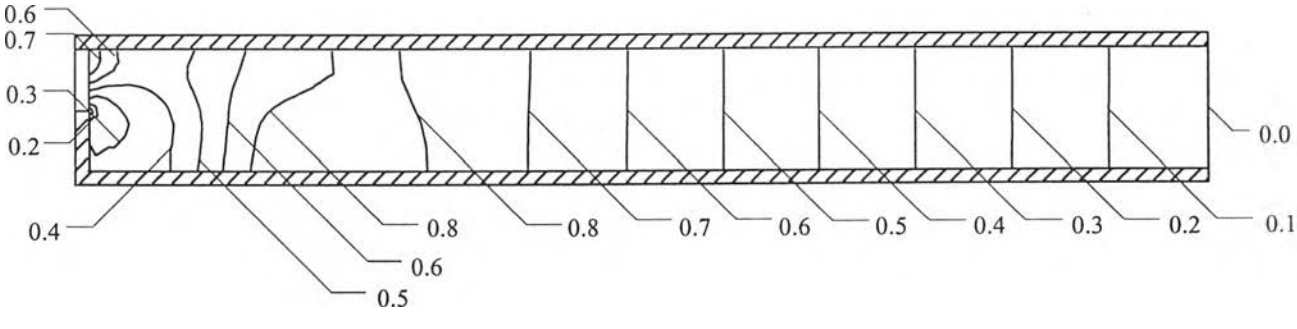
ซึ่งทำให้เห็นว่าการแบ่งเอลิเมนต์แบบสม่ำเสมอในครั้งแรกยังมีความไม่เหมาะสม เนื่องจากผลเฉลยดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 1 นี้มีความเหมาะสมแล้วหรือยัง



รูปที่ 7.11 ลักษณะการแบ่งรูปปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดที่ได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1



รูปที่ 7.12 ผลเฉลยความเร็วของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดกรณีได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1



รูปที่ 7.13 ผลเฉลยความดันของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดกรณีได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1

ดังนั้นจะต้องทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 ต่อไป โดยนำผลเฉลยของความเร็วที่ได้จากกรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1 มาใช้คำนวณปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 ทำให้ได้ลักษณะการแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ดังในรูปที่ 7.14 ซึ่งประกอบด้วย 1,100 เอลิเมนต์ แล้วนำไปหาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ได้ผลเฉลยของความเร็วและความดันดังในรูปที่ 7.15 และ รูปที่ 7.16 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลเฉลยความเร็วและความดันของกรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 1 และกรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 2 มีดังนี้

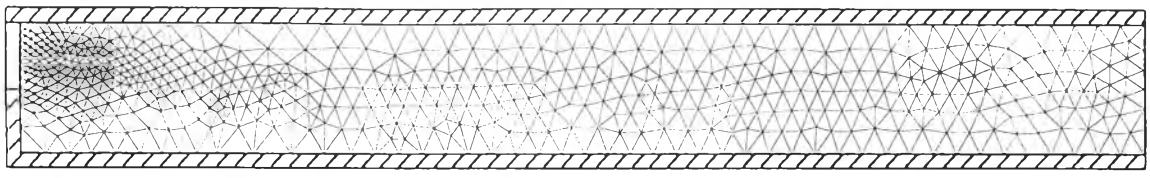
กรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1

NODE	U-VELOCITY	V-VELOCITY	PRESSURE
1	9.476950E-01	-1.628219E-02	6.935600E-01
2	9.134734E-01	-2.830665E-02	6.284467E-01
3	8.659390E-01	-3.510151E-02	5.855954E-01
4	8.080537E-01	-3.768529E-02	5.618998E-01
5	1.430716E+00	-3.814098E-02	6.259970E-01
6	1.403796E+00	-6.787372E-02	5.773769E-01
7	1.364900E+00	-8.773470E-02	5.535020E-01
8	1.314122E+00	-9.942477E-02	5.422315E-01
9	1.432318E+00	-5.408108E-02	5.016242E-01
10	1.415570E+00	-9.330963E-02	4.858144E-01
11	1.399228E+00	-1.195118E-01	4.859065E-01
12	1.382508E+00	-1.375598E-01	4.922198E-01
13	9.474778E-01	-6.551215E-02	3.809934E-01
14	9.626412E-01	-9.276291E-02	4.068976E-01
15	9.955428E-01	-1.119001E-01	4.271776E-01
16	1.033256E+00	-1.297158E-01	4.436887E-01
17	2.127897E-01	2.792601E-04	3.420678E-01
18	3.332096E-01	-1.779739E-02	3.793283E-01
19	4.351723E-01	-4.343917E-02	4.008266E-01
20	5.161355E-01	-6.807536E-02	4.165500E-01

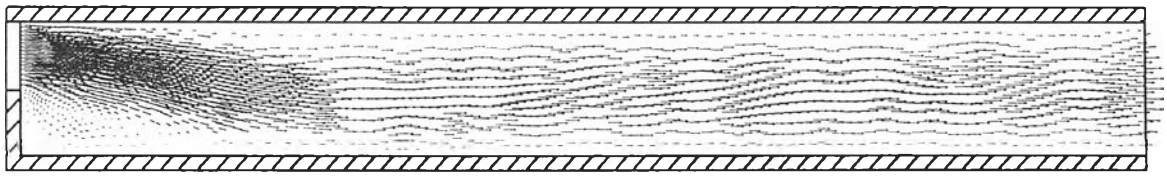
กรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2

NODE	U-VELOCITY	V-VELOCITY	PRESSURE
1	9.476960E-01	-1.656049E-02	6.913634E-01
2	9.133779E-01	-2.830023E-02	6.288133E-01
3	8.648352E-01	-3.510272E-02	5.858358E-01
4	8.086465E-01	-3.775638E-02	5.628532E-01
5	1.429943E+00	-3.800288E-02	6.262040E-01
6	1.403616E+00	-6.774643E-02	5.801999E-01
7	1.364056E+00	-8.761882E-02	5.541737E-01
8	1.314404E+00	-9.947794E-02	5.423925E-01
9	1.432287E+00	-5.400403E-02	5.015767E-01
10	1.415575E+00	-9.316685E-02	4.865546E-01
11	1.399640E+00	-1.193687E-01	4.866080E-01
12	1.382605E+00	-1.375677E-01	4.938402E-01
13	9.474974E-01	-6.512008E-02	3.814855E-01
14	9.627135E-01	-9.242109E-02	4.105210E-01
15	9.955357E-01	-1.118233E-01	4.269907E-01
16	1.033062E+00	-1.300718E-01	4.447837E-01
17	2.137296E-01	1.641195E-03	3.311156E-01
18	3.334057E-01	-1.798534E-02	3.791285E-01
19	4.353702E-01	-4.348531E-02	4.014968E-01
20	5.161382E-01	-6.787569E-02	4.194879E-01

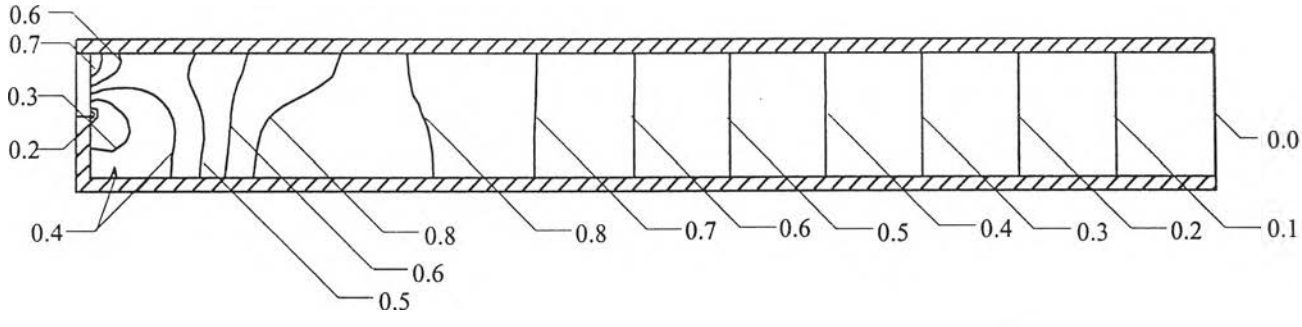
จะเห็นว่า ผลเฉลยมีความใกล้เคียงกันหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นจึงถือเอาผลเฉลยกรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 เป็นผลเฉลยสุดท้ายที่มีความถูกต้อง



รูปที่ 7.14 ลักษณะการแบ่งรูปปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดที่ได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2

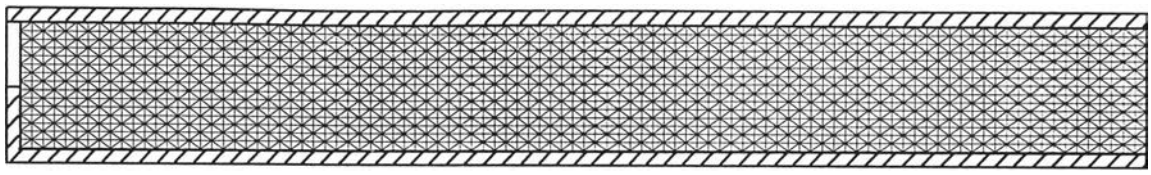


รูปที่ 7.15 ผลเฉลยความเร็วของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดกรณีได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2

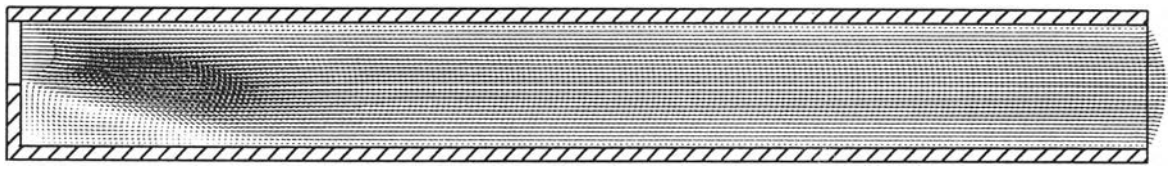


รูปที่ 7.16 ผลเฉลยความดันของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดกรณีได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2

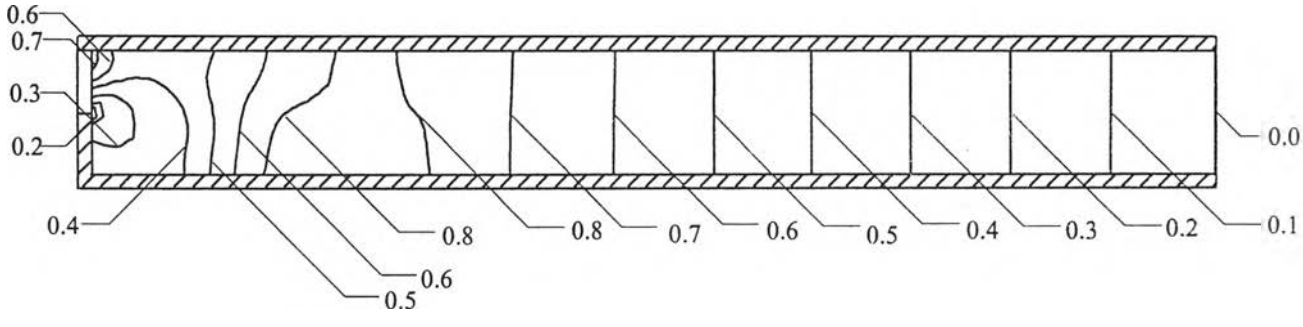
ในการตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีดังกล่าว ได้ทำการตรวจสอบกับกรณีที่ใช้ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่มีการแบ่งรูปปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบละเอียด โดยขนาดเอลิเมนต์ที่ใช้มีขนาดใกล้เคียงกับเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กของกรณีที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์เรียบร้อยแล้ว ซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์ 2,970 เอลิเมนต์ ดังในรูปที่ 7.17 ผลเฉลยของความเร็วและความดันแสดงไว้ในรูปที่ 7.18 และ รูปที่ 7.19 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลเป็นวิธีการวิเคราะห์ปัญหาที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถให้ผลเฉลยที่มีความถูกต้องแม่นยำโดยใช้หน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่มากเท่ากับกรณีที่ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งในหลาย ๆ ปัญหาไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียวที่ต้องใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กจำนวนมากบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำที่จำกัด



รูปที่ 7.17 ลักษณะการแบ่งรูปปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดที่ได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2



รูปที่ 7.18 ผลเฉลยความเร็วของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดกรณีใช้เอลิเมนต์แบบละเอียดสำหรับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 7.19 ผลเฉลยความดันของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดกรณีใช้เอลิเมนต์แบบละเอียดสำหรับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียว