

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การไหลภายในเครื่องอบแห้งทรงกระบอกโดยใช้ CFD

ANALYSIS OF AIRFLOW IN CYLINDRICAL DRYER USING CFD



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **61714**  
วัน,เดือน,ปี **21 ก.ค. 2549**

b. 11583800  
i. ....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์การไหลภายในเครื่องอบแห้งทรงกระบอกโดยใช้เทคนิค CFD

Analysis of Airflow in Cylindrical Dryer Using CFD

ผู้จัดทำ

นายนรินทร์ ตุงคะศิริ

นายพฤกษ์ กิ่งสัมฤทธิ์

นายสุภาวัฒน์ สุขสำนวน



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ เอกสิทธิ์ ศรีธรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์การไหลภายในเครื่องอบแห้งทรงกระบอกโดยใช้เทคนิค CFD

|                  |                          |
|------------------|--------------------------|
| นายนรินทร์       | ตุงกะศิริ                |
| นายพฤษัย         | กิ่งสัมฤทธิ์             |
| นายศุภวัฒน์      | สุขสำนวน                 |
| อาจารย์เอกสิทธิ์ | ศรีธรรม อาจารย์ที่ปรึกษา |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประยุกต์ใช้เทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD) ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของกระแสลมในห้องอบแห้งทรงกระบอก จากการศึกษาพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณด้วย CFD เทียบกับค่าจากการวัด โดยเฉลี่ยเท่ากับ 21.1% ที่สภาวะการป้อนลมที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเร็วลมภายในห้องอบ มีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.) เท่ากับ 7.905%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Analysis of Airflow in Cylindrical Dryer Using CFD

Mr. Narin      Tungkasiri  
Mr. Phruk      Kingsumrit  
Mr. Supawat   Suksumnong  
Mr. Eakasit    Sritham (Advisor)

### ABSTRACT

This project was aimed to implement a Computational Fluid Dynamic (CFD) technique for analysing airflow patterns in a cylindrical dryer. It was found that the Relative Mean Absolute Difference between the calculated velocity by CFD and the measured velocity was about 21.1%. With the optimal design obtained from simulations the coefficient of variance (C.V.) of air velocity magnetude in the dryer was 7.905%



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์เอกสิทธิ์ ศรีธรรม ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้การแนะนำในการแก้ปัญหาตลอดจนความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ ท่านคณาจารย์ทุกๆ ท่านในภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ให้คำแนะนำติชม ในการทำโครงการของคณะผู้จัดทำ สอบถามและความช่วยเหลือต่างๆ ที่ช่วยทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์วีระชัย ลีพรชัยเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ช่วยแนะนำให้รู้จักเทคนิค CFD เบื้องต้น

ขอขอบพระคุณ พี่อาทิตย์ ฤทธิเลื่อน (ไอ้ต, วิศวกรรมเกษตร รุ่น 13) ที่ช่วยในการศึกษา และเทคนิคการใช้ CFD อย่างลึกซึ้ง ตลอดจนการให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่ดีมากๆ อยู่เสมอ โดยไม่จำกัดเวลา

ขอขอบคุณพี่แมน (นิเวศเชิด) และเพื่อนๆ วิศวกรรมอาหาร (ต่อเนื่องรุ่น1) ทุกๆ คนที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือ ทุกๆ เรื่องภายใน ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และออกกำลังทรัพย์ในทุกๆ ด้านตลอดเวลาที่ทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วง



## สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | ก  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | ข  |
| กิตติกรรมประกาศ  | ค  |
| สารบัญ   | ง  |
| รายการรูปประกอบ  | จ  |
| รายการตาราง  | ฉ  |
| <br>   |    |
| บทที่ 1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา                                      | 1  |
| 1.1 บทนำ   | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์   | 2  |
| <br>   |    |
| บทที่ 2 สํารวจเอกสาร   | 3  |
| 2.1 วิวัฒนาการของกรรมวิธีการอบแห้ง                                     | 3  |
| 2.2 ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง                                | 4  |
| 2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหล                               | 5  |
| 2.4 การถ่ายเทความร้อน  | 6  |
| 2.5 เทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD)                           | 8  |
| 2.6 การประยุกต์ใช้เทคนิค Computational Fluid Dynamic ในอุตสาหกรรมอาหาร | 15 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 16 |
| <br>   |    |
| บทที่ 3 เครื่องมือ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง                              | 18 |
| 3.1 เครื่องมือในการทดลอง   | 18 |
| 3.2 วิธีการทดลอง   | 19 |
| 3.2.1 การวัดความเร็วลมในห้องอบแห้ง                                     | 19 |
| 3.2.2 การตั้งค่าในโปรแกรม CFD  | 21 |
| 3.2.3 การเปรียบเทียบค่าจากการวัดและการคำนวณแบบจำลองโดย CFD             | 22 |
| 3.2.4 การหารูปแบบการป้อนกระแสลมที่เหมาะสม                              | 23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  |    |
|--|----|
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง                        | 25 |
| 4.1 การกระจายความเร็วของกระแสลมภายในถังอบแห้ง                      | 25 |
| 4.2 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลมที่วัดได้และจากการคำนวณ             | 28 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการป้อนลมที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิค CFD | 31 |
| <br>   |    |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ                                | 38 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง   | 38 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ   | 38 |
| <br>   |    |
| บรรณานุกรม   | 39 |
| ภาคผนวก  | 41 |
| ก. ตำแหน่งจุดที่ใช้ทำการวัดความเร็วกระแสลม                         | 42 |
| ข. แสดงพิกัดต่างๆ ที่ใช้ในการวัดกระแสความเร็วลม                    | 44 |
| ค. ผลการบันทึกกระแสความเร็วลมเปรียบเทียบการคำนวณโดย CFD            | 48 |
| ง. ผลการบันทึกความเร็วจากการคำนวณโดย CFD                           | 54 |



## รายการรูปประกอบ

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การกระจายตัวของอนุภาคและอุณหภูมิภายใน Spay Dryer  | 13   |
| 2.2 อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบ  | 13   |
| 2.3 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบกรวย   | 14   |
| 2.4 ทิศทางการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบกรวย   | 14   |
| 3.1 ชุดทดลองอบแห้ง  | 18   |
| 3.2 ชุดกระจายลมร้อนที่เข้าด้านข้างของห้องอบแห้ง   | 19   |
| 3.3 ตำแหน่งที่มีการวัดความเร็วลมทั้ง 3 ระนาบ  | 20   |
| 3.4 ตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลม  | 20   |
| 3.5 กริดบนจุดต่อต่างๆของปริมาตรห้องอบแห้ง   | 22   |
| 3.6 แสดงทิศทางการป้อนกระแสลม  | 24   |
| 4.1 การกระจายตัวของลมโดยรวมภายในห้องอบแห้ง  | 24   |
| 4.2 เส้นทางการไหลของกระแสลม (Velocity Magnitude) จากช่องทางเข้าที่ 1 ( $Y = 75 \text{ cm.}$ ) | 24   |
| 4.3 การไหลของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 2 ( $Y = 50 \text{ cm.}$ )        | 25   |
| 4.4 การไหลของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 3 ( $Y = 25 \text{ cm.}$ )        | 25   |
| 4.5 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) บนระนาบ X-Y                                   | 26   |
| 4.6 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ในระนาบ X-Z                                   | 27   |
| 4.7 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 1 ( $Y = 75 \text{ cm.}$ )  | 28   |
| 4.8 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 2 ( $Y = 50 \text{ cm.}$ )  | 28   |
| 4.9 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 3 ( $Y = 25 \text{ cm.}$ )  | 28   |
| 4.10 ค่าความเร็วลมจากการวัดและการคำนวณ ณ จุดต่างๆ ในรูปแบบการป้อนที่ 1                        | 30   |
| 4.11 ค่าความเร็วลมจากการวัดและการคำนวณ ณ จุดต่างๆ ในรูปแบบการป้อนที่ 2                        | 30   |
| 4.12 ทิศทางการป้อนกระแสลมแบบพุ่งเข้าด้านข้างห้องอบแห้ง ( $Y=50 \text{ cm.}$ )                 | 31   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.13 ทิศทางป้อนกระแสลมแบบพุ่งตรงห้องอบแห้ง (Y= 50 cm.)                                   | 32   |
| 4.14 รูปแบบการป้อนลมที่เข้าห้องอบ  | 33   |
| 4.15 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 1                                       | 34   |
| 4.16 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 2                                       | 34   |
| 4.17 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 3                                       | 35   |
| 4.18 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 4                                       | 38   |
| 4.19 การกระจายตัวของกระแสลมที่สม่ำเสมอมากที่สุดจากการออกแบบการป้อนอัตรา<br>ไหลของกระแสลม | 37   |



รายการตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.1 รูปแบบการป้อนกระแสลมในห้องอบแห้ง                                     | 21   |
| 3.2 การป้อนลมใน 4 กรณี   | 22   |
| 4.1 ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมจากการคำนวณและจากการวัดกรณีป้อนลมในรูปแบบที่ 1 | 31   |
| 4.2 ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมจากการคำนวณและจากการวัดกรณีป้อนลมในรูปแบบที่ 2 | 31   |
| 4.3 เปรอ์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความผิดพลาดของแต่ละกรณี                       | 36   |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในสมัยก่อน ในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับการไหลของของไหลใดๆจำเป็นต้องพึ่งพาการทดลอง เช่น การออกแบบรูปร่างรถยนต์ วิธีที่ทำกันมาโดยตลอดคือ การสร้างรูปร่างรถยนต์ด้วยดินเหนียวแล้วนำไปทดลองในอุโมงค์ลม ที่มีหมอกควันสีเทาวิ่งเป็นแนวเส้นผ่านตัวรถเพื่อให้ทราบถึงลักษณะการไหลและความแปรปรวนของอากาศผ่านตัวรถนั้น หากลักษณะแนวเส้นของหมอกควันนั้นมีความแปรปรวนมาก เช่น เกิดการไหลย้อนกลับในตอนท้ายของตัวรถก็จะทำให้รถวิ่งช้าลง อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงต้นแบบรูปร่างรถยนต์ที่ทำจากดินเหนียวนั้นจำเป็นต้องใช้เวลามาก รวมทั้งต้องนำไปทดลองใหม่

ในปัจจุบันการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลสามารถใช้เทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD) ซึ่งจะช่วยให้ทราบลักษณะการไหลของของไหลผ่านทางคอมพิวเตอร์ หากผลลัพธ์ที่ได้ไม่เหมาะสมแล้ว การเปลี่ยนแปลงรูปแบบบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ก็สามารถทำได้ในระยะเวลาอันสั้น (ปราโมทย์ และวารสิทธิ์, 2558)

นอกจากการนำ CFD มาใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์แล้วก็ยังมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบระบบการปรับอากาศอันจะทำให้เกิดความอุ่นและความเย็นที่พอเหมาะจากการหมุนเวียนของอากาศที่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องที่มีขนาดใหญ่และรูปร่างที่ซับซ้อนจะทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบ การนำ CFD มาใช้จะช่วยให้เห็นข้อบกพร่องต่างๆ ได้อย่างชัดเจน (Xia and Sun , 2002 )

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายๆ ท่านได้นำเทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD) มาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอาหารกันอย่างแพร่หลาย เช่นการออกแบบเครื่องมือในการแปรรูปอาหารต่างๆ เพื่อที่จะศึกษาการไหลของของไหล อุณหภูมิที่จุดต่างๆ รวมทั้งค่าที่เหมาะสมในการผสมของสารหลายๆ ชนิด เช่น การทำแห้ง การฆ่าเชื้อ การแช่แข็ง การผสม และในงานด้านอื่นๆ ที่มากมาย (Scott and Richardson , 1997 )

การอบแห้งเป็นการแปรรูปอาหารที่ได้รับความนิยมมากในอดีตและปัจจุบันผลไม่อบแห้งเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทยอีกชนิดหนึ่ง จากข้อมูลการส่งออกพบว่ามียอดค่าการส่งออกสินค้าผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบแห้งไปยังทุกประเทศทั่วโลกเท่ากับ 9696.16 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2543 และเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.7 เป็น 10734.70 ล้านบาท ในปี 2544(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์)

ตลอดจนเครื่องอบแห้งที่มีคามต้องการตลาดบางชนิดยังมีการกระจายลมร้อนที่ไม่สม่ำเสมอเป็นผลทำให้ปริมาณความชื้นของผลไม้อบแห้งไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ขายไม่ได้ราคา จึงได้นำเทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD) มาช่วยในการศึกษาการกระจายตัวของอากาศภายในเครื่องอบแห้งเพื่อทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์โดยทั่วไปของโครงการนี้เพื่อทำการศึกษาและทดลองนำเทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD) มาช่วยในการออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังนี้

1. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอากาศและอุณหภูมิภายในถังอบสำหรับการป้อนลมรูปแบบต่างๆ
2. เพื่อเปรียบเทียบความเร็วและอุณหภูมิของลมที่ได้จากการจำลองการด้วย CFD เทียบกับความเร็วลมที่วัดจากเครื่องอบแห้งจริง



## บทที่ 2

### สำรวจเอกสาร

#### 2.1 วิวัฒนาการของกรรมวิธีการอบแห้ง

สมัยแรกๆ การทำแห้งจะใช้ตากแห้งโดยแสงแดดนั้นที่อัตราการอบแห้งช้ามาก ไม่สามารถควบคุมอัตราการอบแห้งได้ ต่อมาจึงมีการสร้างตู้อบหรือห้องอบขึ้นมาและพัฒนาแหล่งให้ความร้อน แต่ผลิตได้ครั้งละไม่มาก จึงได้มีการสร้างตู้อบแบบอุโมงค์ให้วัตถุดิบเคลื่อนตามห้องอบซึ่งเป็นอุโมงค์ยาวๆ ที่มีลมร้อน ทำให้สามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง แต่การอบแห้งจำกัด เนื่องจากอากาศร้อนสัมผัสผิวหน้าของวัตถุนั้น จึงมีการพัฒนาสร้างเครื่องอบแห้งแบบ โรตารี (Rotary dryer) และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบค ทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศร้อนมีมาก อัตราการอบแห้งสูงมาก วัตถุที่อบแห้งต้องมีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือใกล้เคียง ขนาดไม่ใหญ่ จึงนิยมที่จะใช้อบแห้งพวกเมล็ดธัญพืช ตัวอย่างเครื่องอบแห้ง (สมชาติ, 2540)

1) เครื่องอบแห้งแบบตู้หรือห้องอบ (Cabinet drying) เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ลมพัดผ่านอากาศที่มีลักษณะเป็นขึ้น ซึ่งวางเรียงหรือแขวนอยู่ในห้องอบ ทำงานเป็นแบบกะ อาศัยการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนมีชื่อเรียกหลายชื่อตามลักษณะการทำงาน เช่น Cabinet dryer, Tray dryer, Pan dryer, และ Bin dryer เป็นต้น

2) เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel Dryer) มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องทำให้อัตราการผลิตสูงขึ้น ลักษณะเป็นห้องยาวๆ แบบอุโมงค์ มีอาหารวางเรียงบนรถเข็นหรือสารพาน ผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีลมร้อนไหลสวนทางมาหรือไหลขนานกันไปตามการออกแบบอัตราการอบแห้งเร็วขึ้นเริ่มพัฒนาใช้เมื่อปี 1847 โดย Yule แบ่งออกเป็น Single-Stage tunnel, Two-Stage-Tunnels and Multi-Stage tunnels เครื่องอบแห้งที่มีหลักการการทำงานคล้ายๆ กันคือ Conveyor dryer, Belt dryer เป็นต้น

3) เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary dryer) ลักษณะเป็นห้องหรือตู้อบที่หมุนได้ ทำให้อาหารมีการพลอบหน้าพื้นที่ผิวหน้าของอากาศสัมผัสกับอากาศร้อนมากขึ้น อัตราการอบแห้งสูงขึ้น วิธีนี้ต้องมีอากาศถ่ายเทอากาศดี ๆ

4) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบค เป็นการอบแห้งที่มีอัตราการแห้งสูงมาก ลักษณะเป็นห้องอบแห้งทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า อนุภาคของแข็งจะถูกเป่าให้ลอยตัวอยู่ในอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งตลอดเวลา ทำให้พื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคได้สัมผัสกับอากาศร้อน ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เร็วมาก อัตราการอบแห้งจึงสูงและสามารถทำแบบต่อเนื่องได้ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดที่ใช้ได้อุณหภูมิที่ มีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป และควรมีลักษณะใกล้เคียงทรงกลม เช่น พวกเมล็ดธัญพืชต่าง ๆ และเมล็ด พลาสติก เป็นต้น

5) เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอก (Drum Dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ได้ดีกับพวกวัตถุดิบที่เป็นของเหลวที่มีความหนืดและไหลได้พอสมควร โดยเฉพาะพวกที่มีส่วนประกอบของแข็งสูง ๆ ลักษณะเป็นลูกกลิ้งทรงกระบอก ให้ความร้อนโดยไอน้ำหรือไฟฟ้าจากภายในลูกกลิ้ง ความร้อนจะถ่ายเทแบบการนำความร้อนไปยังผิวลูกกลิ้ง ซึ่งหมุนและมีอาหารเหลวเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ติดอยู่ที่ผิวอาหารเหลวแห้งได้เร็วมาก มีอัตราการอบแห้งสูงพอสมควรมีหลายแบบ เช่น Single-Drum, Double-Drum, Twin-Drum และ Vacuum-Drum Dryer เป็นต้น

6) เครื่องอบแห้งแบบระบบพ่นฝอย (Spray Dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่นิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น นมผง กาแฟผง โดยอาศัยหลักการของการพ่นอาหารเหลวให้แตกเป็นละอองเล็ก ๆ ภายในห้องอบที่มีอากาศร้อน ไหลสวนทางหรือไหลขนาน ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงมาก เนื่องจากอาหารเหลวแตกเป็นละอองเล็ก ๆ เมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนจึงทำให้ระเหยไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะเป็นผงออกมา ประสิทธิภาพของการอบแห้งระบบนี้ขึ้นกับความสามารถในการพ่นละอองของหัวฉีดเป็นสำคัญ

7) เครื่องอบแห้งแบบการเกิดฟอง (Foam-mat Dryer) เทคนิคนี้เริ่มพัฒนาเมื่อปี ค.ศ. 1960 ที่ USDA'S Western Regional Research Laboratory นิยมใช้กันในการทำน้ำผลไม้ผง เช่น น้ำส้ม น้ำมะเขือเทศ และน้ำองุ่น เป็นต้น โดยอาศัยหลักการของการทำให้น้ำผลไม้เกิดเป็นฟองเล็ก ๆ โดยการใส่สารที่ช่วยให้เกิดฟอง (Foaming agent) แล้วฟองของน้ำผลไม้จะไปตามตัวกลางหรือสายพานที่มีความร้อน น้ำจะระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำมาก อาจเหลือเพียง 1 % เท่านั้น เครื่องมือที่ใช้มี 2 แบบคือ Belt dryer operation และ Tray dryer operation

## 2.2 ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง (สมบัติ, 2529)

ปัจจัยสำคัญ ๆ ต่อการอบแห้ง มีดังนี้

1) ความเร็วลมการที่จะทำให้ความชื้นระเหยได้เร็ว ทางหนึ่งจะทำได้โดยใช้อากาศพัดพาเอาไอน้ำที่อยู่บริเวณผิวหน้าของวัสดุหลุดลอยไป ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุและความชื้นในอากาศตรงบริเวณใกล้เคียงมีความแตกต่างกันมาก ๆ ถ้าหากบังคับให้อากาศไหลผ่านผิวหน้าวัสดุมากขึ้น หรือเร็วขึ้น ก็จะเป็นแรงผลักดันแรงหนึ่งให้ความชื้นระเหยได้เร็วขึ้นและถ้าอากาศนั้นมี

อุณหภูมิสูงด้วยก็จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงตามไปด้วยโมเลกุลของน้ำที่อยู่ตามช่องว่างของเนื้อวัสดุถูกแรงกระตุ้นจากพลังงานความร้อนให้เคลื่อนไหวได้รุนแรงแล้วแพร่กระจายสู่ผิวหน้าของวัสดุเร็วขึ้น

2) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative humidity) อากาศที่ผ่านไประหว่างชั้นของวัสดุถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศน้อย ๆ จะทำให้คล้ายกับมีแรงขับเคลื่อนไอน้ำจากผิวหน้าของวัสดุเข้าสู่ชั้นบรรยากาศได้เร็วขึ้น แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงขึ้น อัตราเร็วของโมเลกุลไอน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุจะแทรกตัวเข้าสู่ชั้นบรรยากาศก็น้อยลงเพราะถูกโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่แล้วในอากาศชนสะท้อนกลับมากที่เดิม ดังเช่นตัวอย่าง ถ้าน้ำเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 12.5 ทิ้งผึ่งอากาศไว้ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 แล้ว ในที่สุดก็จะได้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 12.5 ส่วนอีกกรณีหนึ่งถ้าเมล็ดข้าวโพดมีความชื้นถึงร้อยละ 12.5 แล้วจึงหยุด ดังนั้น ผู้ที่ทำหน้าที่ควบคุมการระบายอากาศในถังไซโลเก็บเมล็ดข้าวโพด ต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องนี้ให้ดีเนื่องจากถ้าเก็บเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นร้อยละ 15 ซึ่งคืออยู่แล้ว การระบายอากาศเมื่ออากาศภายนอกมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 จะทำให้เมล็ดเพิ่มความชื้นเป็นร้อยละ 19 ซึ่งเป็นความชื้นสูงเกินต้องการอุณหภูมิอากาศร้อน

3) อุณหภูมิอากาศร้อน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงอาจทำลายหรือทำให้สุกหรือทำให้วัสดุร้าวซึ่งเกิดจากความเค้น (stress) ภายในเนื้อ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ประสอภัยของการอบ

## 2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหล

ของไหลหมายถึงสสารที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ตามลักษณะของภาชนะที่บรรจุ ที่สภาวะสมดุลของไหลจะหยุดอยู่นิ่งๆ และไม่มีแรงเฉือนเกิดขึ้น ถ้ามีแรงเฉือนเพียงเล็กน้อยกระทำกับของไหลจะทำให้ของไหลเกิดการไหลอย่างต่อเนื่องได้ ของไหลสามารถแบ่งได้เป็น 2 สถานะ (วิศิษฐ์และขวัญชัย, 2544)

- ของเหลว
- ก๊าซ

รูปแบบการไหลของไหลที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน โดยการไหลจะเป็นแบบราบเรียบก็ต่อเมื่อค่า เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) น้อยกว่า 2300 และการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อค่า เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) มีค่ามากกว่า 4000 สำหรับบริเวณการเปลี่ยนแปลง (transition region) การไหลอาจเป็นได้ทั้งราบเรียบและปั่นป่วน สำหรับการใช้งานกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อค่า  $Re > 2300$  สำหรับการไหลภายในท่อ โดยสามารถคำนวณหาค่า Re ได้จากสมการต่อไปนี้ (มนตรี, 2545)

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

โดยที่  $V$  = ความเร็วของการไหล (m/s)

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

$\mu$  = ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล (N.s/m<sup>2</sup>)

แต่ถ้าท่อไม่เป็นหน้าตัดวงกลมจะหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_L = \frac{4A}{W} \quad (2.2)$$

โดยที่  $A$  = พื้นที่หน้าตัด (m<sup>2</sup>)

$W$  = ผลบวกของเส้นรอบขอบเปียก (m)

## 2.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนมีด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ดังมีรายละเอียดดังนี้

### 1) การนำความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนกำหนดโดยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอาหารและตัวกลางในการให้ความร้อนหรือทำให้เย็นและความต้านทานโดยรวมของการถ่ายเทความร้อน ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนแสดงโดยการนำความร้อนของวัตถุหรือแสดงในรูปของค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่สภาวะ steady – state อัตราการถ่ายเทความร้อนคำนวณได้โดย

$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{X} \quad (2.3)$$

ขณะที่  $Q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อน (J/s)

$k$  = ค่าการนำความร้อน (J/ms K หรือ W/m K)

$A$  = พื้นที่ผิว (m<sup>2</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(T_1 - T_2)$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$x$  = ความหนาของวัตถุ (m)

$(T_1 - T_2)/x$  = เกรเดียนหรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )

## 2) การพาความร้อน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของเหลวจะทำให้ความหนาแน่นของของเหลวเปลี่ยนไปด้วย มีผลทำให้เกิดการไหลเวียนหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เกิดขึ้นเมื่อใช้เครื่องกวนหรือพัดลมกวนของเหลวหรืออากาศ มีผลทำให้อัตราการถ่ายเท ความร้อนสูงขึ้นและกระจายอุณหภูมิได้รวดเร็วกว่าการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของเหลวไปยังผิวอาหารคำนวณได้จาก

$$Q = h_s A (T_b - T_s) \quad (2.4)$$

|            |   |  |
|------------|---|--|
| ขณะที่ $Q$ | = | อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน (J/s)   |
| $A$        | = | พื้นที่ผิว ( $\text{m}^2$ )  |
| $T_s$      | = | อุณหภูมิผิวน้ำวัตถุ ( $^{\circ}\text{C}$ )   |
| $T_b$      | = | อุณหภูมิของของเหลว (bulk fluid) ( $^{\circ}\text{C}$ )                               |
| $h_s$      | = | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวน้ำหรือฟิล์มบาง ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) |

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวน้ำ (Surface that transfer coefficient) วัดได้จากความต้านทานต่อการไหลของความร้อนซึ่งเกิดจากฟิล์มบาง ๆ รอบวัตถุ โดยมีค่าเท่ากับ  $k/x$  ในสมการการนำความร้อน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวน้ำในการไหลแบบสตรีมไลน์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวน้ำวัตถุจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว (เช่น ความหนาแน่น ความหนืด และความร้อนจำเพาะ) ความถ่วงจำเพาะ (ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนเวียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น) ความแตกต่างของอุณหภูมิและความยาวหรือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของภาชนะบรรจุ

## 3) การแผ่รังสี

การแผ่รังสี คือ พลังงานความร้อนซึ่งแผ่ออกโดยสาร ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ แม้ว่าเราจะเน้นการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวที่เป็นของแข็ง แต่การแผ่รังสีก็สามารถเกิดได้กับของเหลวและ ก๊าซ และไม่ว่าสารจะมีสถานะใดก็ตาม การแผ่รังสีจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ในอะตอมของสาร การแผ่รังสีไม่ต้องมีตัวกลางเหมือนกับการนำหรือการพาความร้อน (พงษ์เจต, 2534)

โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนระหว่างอาหารและตัวกลางจะเกิดควบคู่กันทั้งแบบการพาความร้อนและการนำความร้อน ควบคู่กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถแสดงในรูปของ ดังนี้

$$U = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม}$$

$$q = UA\Delta T = \frac{\Delta T}{R}$$

$$R = \frac{1}{UA}$$

$$A = \text{พื้นที่ผิว (m}^2\text{)}$$

$$\Delta T = \text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ (}^{\circ}\text{C)}$$

## 2.5 เทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน รวมถึงแผ่การกระจายของอนุภาค เช่น การเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาผลเฉลยเชิงตัวเลขและจำลองการไหลที่เกิดขึ้นในระบบที่พิจารณา ปัจจุบันวิธีการดังกล่าวมีประโยชน์และใช้กันอย่างกว้างขวางมากในวงการอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่างๆ (นิรันดาม, \_\_\_\_\_)

- ศึกษาการไหลของอากาศผ่านรถยนต์และอากาศยานเพื่อหาแรงยกและแรงต้าน
- ศึกษาการไหลของกระแสลมผ่านลำเรือ
- ศึกษาการไหลของของไหลผ่านปั๊มคอมเพรสเซอร์
- ศึกษาการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบและเทอร์ไบน์
- การหล่อเย็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- กระบวนการทางเคมี เช่น การผสมกันของสารเคมี
- การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวตึกอาคาร
- การกระจายของมลภาวะในอากาศน้ำ

การใช้ประโยชน์ของ CFD เริ่มจาก ปี ค.ศ. 1960 โดยใช้วิธีการศึกษาเพื่อออกแบบอากาศยานและเครื่องยนต์เจ็ท หลังจากนั้นก็ได้ประยุกต์ใช้กับการออกแบบเครื่องยนต์สันดาปภายในของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์เพื่อประโยชน์ในการออกแบบให้รถยนต์เกิดแรงต้านน้อยที่สุด

โปรแกรม CFD ที่เขียนขึ้นหรืออาจได้มาจากการนำโปรแกรมสำเร็จมาใช้นั้น มีขั้นตอนของการทำงานของโปรแกรมแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

### 1. ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processor)

- ลักษณะรูปร่างของปัญหา
- การปริมาตรควบคุมปัญหา
- กำหนดคุณสมบัติการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## - กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต

ค่าของผลเฉลยของปัญหาการไหลที่ต้องการหา เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ นั้นจะเป็นค่าผลเฉลยที่จุดต่อของแต่ละเซลล์ ความถูกต้องที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดต่อ เซลล์ที่มีจุดต่อมากจะทำให้ได้ความถูกต้องมากกว่าเซลล์ที่มีจุดต่อน้อย ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึง 2 ส่วนคือ จำนวนจุดที่เหมาะสมและความถูกต้องของผลเฉลย โดยต้องคำนึงถึงเวลาในการคำนวณที่ไม่ยาวนานเกินไป

### 2. ขั้นตอนการคำนวณ

วิธีการคำนวณหาผลเฉลยมีหลายวิธีดังต่อไปนี้

#### 2.1 วิธีผลต่างต่อเนื่อง (Finite difference method)

เป็นการหาผลเฉลยที่ไม่ทราบค่า  $\Phi$  ที่จุดต่อต่างๆ บนกริดเทอมของสมการการไหลที่อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์บางส่วน (PDE) จะถูกกระจายโดยใช้ออนุกรมเทเลอร์ให้อยู่ในรูปของผลต่างโดยประมาณบนจุดต่างๆ ซึ่งจะทำให้สมการของระบบซึ่งอยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยบางส่วนกลายเป็นสมการผลต่าง (Difference Equation) ของตัวที่ไม่ทราบค่าของจุดต่างๆ

#### 2.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

เป็นวิธีแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน จากนั้นพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่เป็นพื้นฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นนั้นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่ จากนั้นปัญหาทั้งหมด เมื่อทำการประยุกต์เข้ากับเงื่อนไขที่ขอบเขตแล้วทำการแก้ชุดสมการดังกล่าว ก็จะได้ค่าผลเฉลยโดยประมาณของค่าที่ต้องการที่จุดต่อต่างๆ ความแม่นยำของผลเฉลยนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถประยุกต์เข้ากับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี

#### 2.3 วิธีสเปกตรัล (Spectral method)

เป็นวิธีหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยใช้พื้นฐานของอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งจะไม่เหมือนวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่หาค่าผลเฉลยที่จุดต่างๆ แต่วิธีการนี้จะให้ค่าผลเฉลยตลอดทั้งโดเมนของปัญหา

#### 2.4 วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method)

เป็นวิธีที่รับการพัฒนามาจากวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ขั้นตอนของกระบวนการเป็นดังนี้

- ทำการอินทิเกรตสมการของปัญหาตลอดปริมาตรควบคุมที่พิจารณาใน โดเมนของปัญหา
- เขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาให้อยู่ในรูปของสมการผลต่าง
- หาค่าผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้วิธีทำซ้ำ

การอินทิเกรตบนปริมาตรที่ควบคุมนั้น เป็นวิธีที่ทำให้วิธีการนี้แตกต่างจากวิธีอื่น การอินทิเกรตปริมาตรใดๆ ตลอดปริมาตรควบคุมนั้น เป็นขั้นตอนพื้นฐานของการพิจารณากฎการอนุรักษ์ปริมาณที่ไหลผ่านเข้าออกของปริมาตรควบคุมนั้น วิธีการนี้เป็นความรู้พื้นฐานที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีสเปคตัล การใช้กฎอนุรักษ์คุณสมบัติใดๆ ซึ่งเป็นความเร็ว เอนทาลปี ที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมนั้น พิจารณาสมดุลของการเปลี่ยนแปลงซึ่งก็คือ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาตรนั้นๆ เมื่อไหลผ่านปริมาตรควบคุม

### 3. ขั้นตอนการแสดงผล

การแสดงผลของโปรแกรมจะออกมาในรูปแบบดังนี้

- แสดงรูปร่างของปัญหา
- กราฟเวกเตอร์
- กราฟคอนทัวร์
- การพื้นที่ 2 และ 3 มิติ
- แสดงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง เช่น การเคลื่อนที่ การหมุน

ขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลขที่สำคัญที่ทำให้การวิเคราะห์ปัญหาการไหลประสบผลสำเร็จนั้นประกอบด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์หลักๆ มีอยู่ 3 หลักการ ดังนี้

- 1) การลู่เข้าสู่ผลเฉลย ผลเฉลยที่ได้จะลู่เข้าและใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำ เมื่อระยะห่างระหว่างริคมีค่าเข้าใกล้ศูนย์
- 2) ความสอดคล้อง วิธีเชิงตัวเลขจะต้องมีความสมมูลกับสมการของไหล
- 3) ความเสถียรภาพ จะทำให้ค่าที่ได้ไม่เกิดการแกว่งไปมาและลู่เข้าได้

สมการพื้นฐานในการหาผลเฉลย (Scott and Richardson , 1997 )

สมการการเคลื่อนที่และความสัมพันธ์ทางกายภาพของ CFD

สมการการอนุรักษ์มวล:

$$\left( \begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล} \\ \text{ต่อหน่วยปริมาตร} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{อัตราการไหลของมวลสุทธิเข้าสู่ปริมาตร} \end{array} \right)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho U)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโมเมนตัม:

$$\left( \begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมโดยการพาความร้อน} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมโดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุล} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{ผลรวมของแรงในระบบ} \end{array} \right)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho U \otimes U) + \nabla \cdot \sigma + B$$

เมื่อ  $\sigma$  คือค่าความเค้นดึงโดย  $\sigma = -p\delta + \mu[\nabla U + (\nabla U)^T]$ ; And  $B = \rho g$  for the Boussinesq approximation

สมการพลังงาน:

$$\left( \begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์และพลังงานภายในโดยการพาความร้อน} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นโดยการนำความร้อน} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{อัตราของงานที่กระทำโดยสิ่งแวดล้อมต่อระบบ} \end{array} \right)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho U H) + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

เมื่อ  $H$  คือ เอนทาลปีรวมโดย  $H = h + \frac{1}{2} U^2$

Equation of state ( Boussinesq approximation ):

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สัญลักษณ์ย่อ

B = body force ( Pa )

g = ความเร่ง (  $m \cdot s^{-2}$  )

h = เอนทาลปีสถิตย์ ( J )

H = เอนทาลปีรวม ( J )

p = ความดัน ( Pa )

t = เวลา ( s )

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ ( K )

$T_0$  = reference temperature in Boussinesq buoyancy approximation ( K )

U = ความเร็วของเวกเตอร์ (  $m \cdot s^{-1}$  )

$\beta$  = volumetric expansion coefficient

$\delta$  = Kronecker delta:  $\delta_{min} = 1$  for  $m = n$  and  $\delta_{min} = 0$  for  $m \neq n$

$\lambda$  = ค่าการนำความร้อน (  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  )

$\mu$  = ความหนืด (  $Pa \cdot s$  )

$\rho$  = ความหนาแน่น (  $kg \cdot m^{-3}$  )

$\rho_0$  = reference density in Boussinesq buoyancy approximation (  $kg \cdot m^{-3}$  )

$\sigma$  = ความเค้น ( Pa )

### การดำเนินการทางเวกเตอร์และเทนเซอร์

$\nabla$  = del, the vector operator. In rectangular co-ordinates, this is given by:

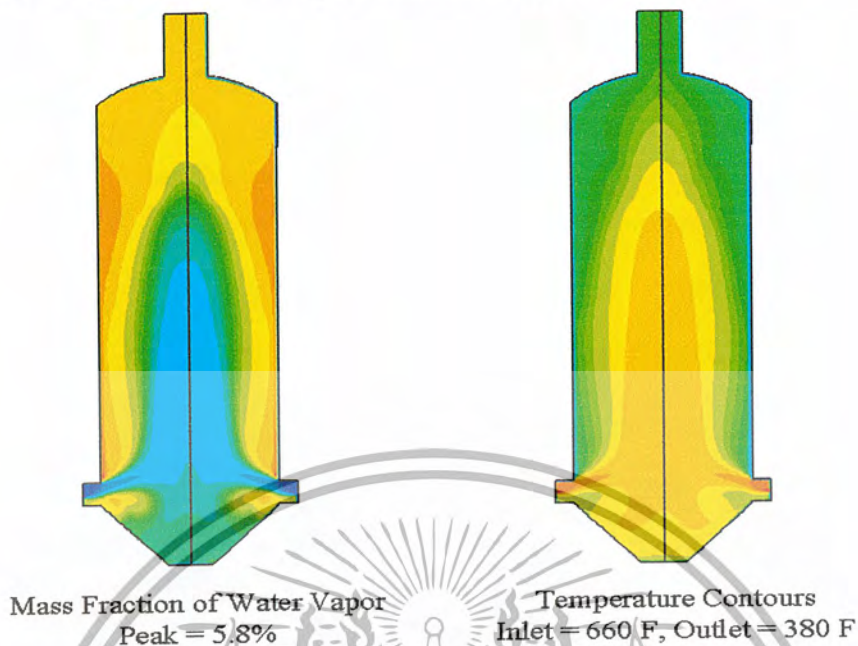
$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

$\nabla V$  = divergence of a vector, defined as:  $\nabla V = \frac{\partial V_i}{\partial x_i}$

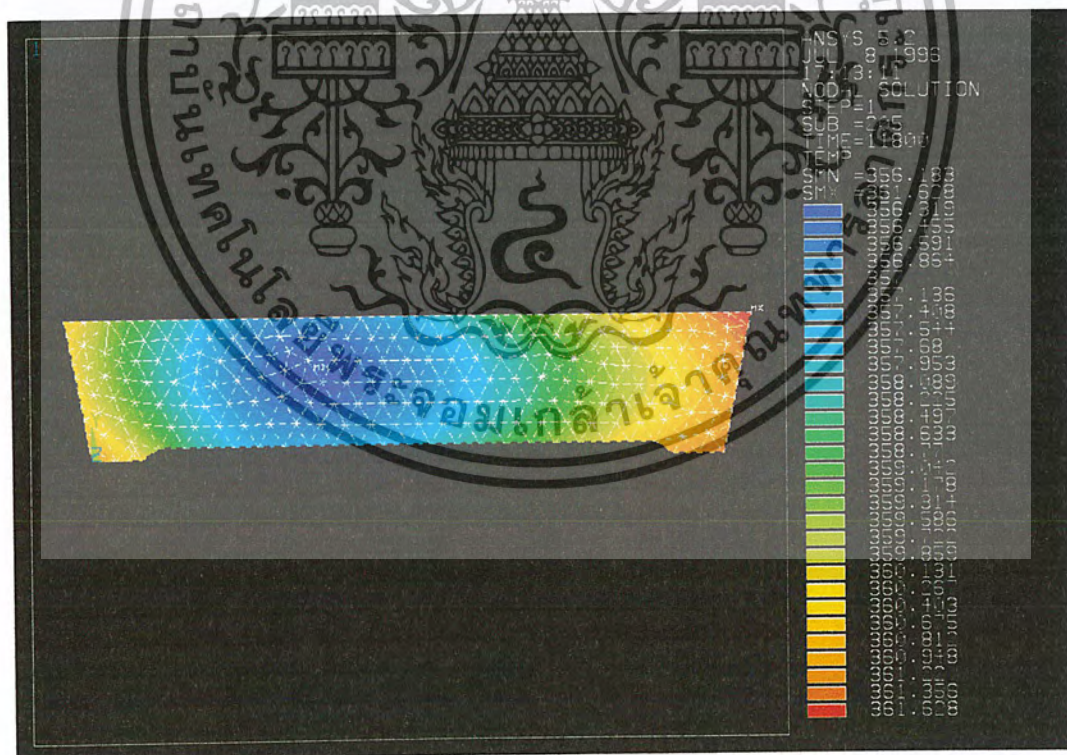
$\otimes$  = tensor product, defined as:  $(A \otimes B)_{ij} = A_i B_j$

$A^T$  = transpose of a tensor A ; if  $A = (A_{ij})$ , then  $A^T = (A_{ji})$

ตัวอย่างการแสดงผลที่ได้จากเทคนิค Computational Fluid Dynamic (CFD )



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงพฤติกรรมของอนุภาคและอุณหภูมิภายใน Spay Dryer



รูปที่ 2.2 อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบกรวย

รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การประยุกต์ใช้เทคนิค Computational Fluid Dynamic ในอุตสาหกรรมอาหาร

Computational fluid dynamics (CFD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนภายในรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆ โดยการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์มาประยุกต์สมการทางคณิตศาสตร์และไม่มีที่ที่ผ่านมามีการนำ CFD มาใช้ในทางอุตสาหกรรมอาหารกันอย่างแพร่หลาย ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้ (Xia and Sun, 2002 )

### 1.) งานด้านอบแห้ง (Drying)

การสร้างแบบจำลองโดยใช้เทคนิค CFD เพื่อศึกษาการไหลของอากาศ คูปริมาณการถ่ายเทความร้อนในจุดต่างๆภายในตู้อบแห้ง รวมทั้งนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งเพื่อกระจายของอากาศภายในถังอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการนำมาออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง เช่น การนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องผลิตกาแฟแบบ spay dry โดยนำเทคนิค CFD ใช้ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศควบคู่ไปกับการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างอากาศและสารละลายการแผ่ภายในเครื่องอบแห้งและนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบสร้างเครื่องอบแห้ง

### 2.) งานด้านการ Sterilisation

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าการบริโภคอาหารที่ปลอดภัย คุณภาพดี และราคาที่เหมาะสม การ Sterilisation เป็นเทคนิคสำคัญในการเก็บและรักษาคุณภาพอาหาร แต่ในการปฏิบัติงานจริงการให้ความร้อนที่ไม่เหมาะสมจะทำให้จุลินทรีย์หยุดทำงาน คุณค่าทางโภชนาการเสียไป รวมทั้งการแต่งกลิ่น สี รส ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงมีการนำ CFD มาใช้ในการช่วยเพื่อหาจุดเหมาะสมในกระบวนการ Sterilisation รวมทั้งการศึกษาระยะการกระจายตัวของอากาศและความร้อนที่ให้กับกระบวนการเพื่อไม่ทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพ และคุณค่าทางอาหาร ตัวอย่างเช่น การใช้ CFD เพื่อการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของแบคทีเรียของจุลชีพ

### 3.) งานด้านการผสม (Mixing)

การผสมถือว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่งของการผลิตแต่ที่ผ่านมามีการที่จะหาค่าที่เหมาะสมในการนำสารต่างๆ มาผสมกันถือว่าเป็นเรื่องยากที่จะรู้ถึงความเหมาะสมของปริมาณสารแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเทคนิค CFD มาประยุกต์เพื่อทำนายปริมาณที่เหมาะสมของสารแต่ละสารที่ รวมทั้งหาค่าความเร็วในการเคลื่อนที่และอุณหภูมิของสารต่างๆ ที่มาผสมกัน

### 4.) งานด้านการแช่แข็ง (Refrigeration)

ใช้ในการทำนายการไหลของอากาศภายในห้องแช่แข็งเนื้อ นำมาออกแบบอัตราการไหลของอากาศในการแช่แข็ง

### 5.)งานด้านอื่นๆ (Other application)

เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ห้องปลอดเชื้อ กระบวนการลวกและเก็บผักผลไม้สด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Staatsma et al. (1999) ได้ทำการสร้างแบบจำลองที่มีชื่อว่า NIZO-DrySim เพื่อที่จะทำการจำลองกระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร โดยแบบจำลองนี้ได้นำมาทำการจำลองการไหลของก๊าซแบบ 2 มิติและทำนายทิศทางการของอนุภาคภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่น (Spray Dryer) โดยใช้เทคนิคของ Computational fluid dynamics (CFD) ใช้สมการแบบปั่นป่วน NIZO-DrySim ได้ใช้หลักการของสมการเชิงอนุพันธ์มาอธิบายการกระจายตัวของอนุภาคทรงกลม

Foster et al. (2001) ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะลดการซึมผ่านของอากาศที่ประตูทางเข้าของห้องแห้งแข็ง โดยโครงการนี้ได้ทำร่วมกับรัฐบาลของสหราชอาณาจักร ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค CFD ร่วมกับการวัดโดยเครื่อง Laser Doppler Anemometry (LDA) จากการทดลองพบว่าประตูที่เปิดประตูของห้องเย็นเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อความเร็วที่ผ่านเข้าออกแต่การเปิดประตูที่กว้างมากจะทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นและจากการทำนายพบว่าความเร็วลมจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ค่าที่ได้จากการทำนายจะมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงโดยค่าที่ได้จากการทำนายจะมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวัดโดย LDA เล็กน้อย

Ficarella et al. (2002) ได้ทำการศึกษาการไหลของของไหลร้อนภายในเครื่องอบแห้งพาสต้า โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการทดลองจริงเพื่อที่จะทำการปรับปรุงอุณหภูมิในการอบแห้งพาสต้า โดยมีการปรับปรุงการกระจายตัวของอากาศและมีช่องกระจายอากาศเป็นรูปเรขาคณิตจากการศึกษาพบว่าความเสียหายของการอบแห้งเส้นพาสต้าลดลงจาก 30% เหลือเพียง 10% และยังสามารถที่จะทำการควบคุมการกระจายตัวของอากาศได้ดีกว่าแบบเก่า

Mirade (2002) ได้ทำการศึกษาระบายอากาศออกจากเครื่องอบแห้งเพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยใช้แบบจำลอง CFD ใน 2 มิติกับขอบเขตเงื่อนไขของการกระจายตัวของความเร็วอากาศ โดยทำการศึกษาเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบเส้นตรง และแบบเป็น โพรง จากการศึกษพบว่า Amplitude ของการระบายอากาศที่ 60%/40% ทั้งในแบบเส้นตรงและแบบ โพรงจะมีความสม่ำเสมอของกระแสอากาศภายในที่ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และความเร็วลมเฉลี่ยภายในจะมีความเร็วที่ 0.6-1.2 m/s

Olsson (2003) ได้ใช้เทคนิคของ CFD มาทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนของอากาศในท่อทรงกระบอกที่มีช่องเปิดหลายๆช่อง (1,2,3ช่อง) ทำการหาค่าการกระจายตัวของ Nusselt Number รอบๆท่อทรงกระบอก จากการทดลองพบว่าลักษณะการไหลและการกระจายตัวของการถ่ายเทความร้อนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับระยะห่างและจำนวนช่องเปิดของกระแสนอากาศโดยจำนวนช่องเปิด 2 ช่องจะได้ผลที่ดีที่สุดโดยค่า Nusselt Number =  $0.2Re^{0.68}$  และค่า Reynold Number ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

วิชชุตาและคณะ (2546) ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน โดยใช้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 65-70 องศาเซลเซียส เพื่อทำการหาอัตราส่วนในการป้อนลมร้อนที่ทำให้ความชื้นของกล้วยสม่าเสมอที่สุดระหว่างด้านข้างและด้านล่างของห้องอบแห้ง จากการทดลองพบว่าอัตราส่วน 50 : 50 อัตราส่วนที่ดีที่สุดในการอบแห้งกล้วย

Nahor et al. (2004) ได้ใช้เทคนิคของ CFD เพื่อศึกษา ความเร็ว อุณหภูมิ และการกระจายตัวของความชื้น ที่เกิดขึ้นในห้องเย็นแบบห้องวางปลาและมีผลิตภัณฑ์อยู่ในห้อง เพื่อดูพฤติกรรมการไหลโดยแบบจำลองที่ใช้จะเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ k-ε model จากแบบจำลองที่ได้พบว่าค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแบบห้องวางปลาอยู่ที่ 22 % และค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในห้องเย็นที่มีผลิตภัณฑ์เท่ากับ 20 %



## บทที่ 3

# เครื่องมืออุปกรณ์และวิธีการทดลอง

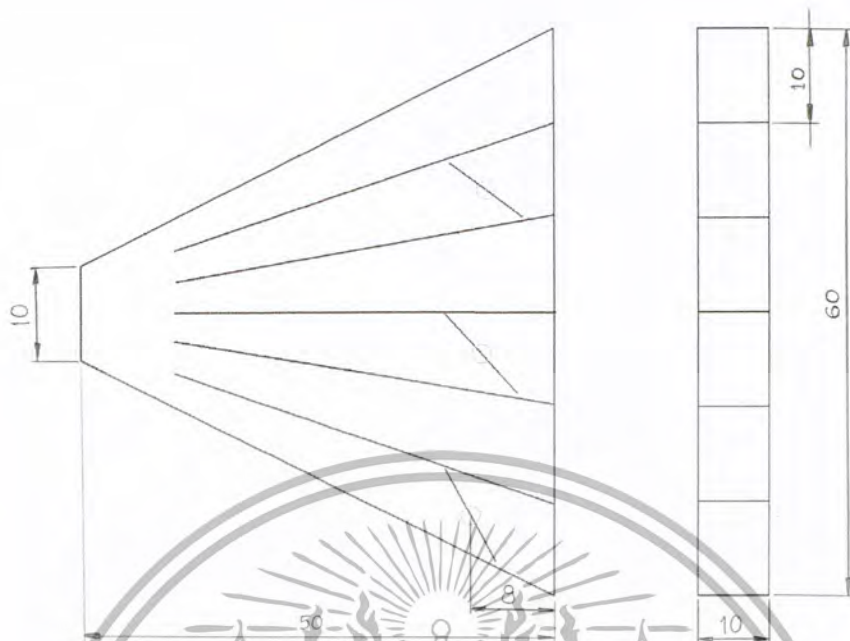
### 3.1 เครื่องมือในการทดลอง

ชุดทดลองอบแห้งแบบถาดหมุนที่จะใช้ในการทดลองนี้เป็นชุดเครื่องมือที่ วิชชุดดาและคณะ (2546) ได้ออกแบบและสร้างไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ห้องอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เมตร สูง 1.4 เมตร ด้านข้างและด้านล่างมีการติดตั้งท่อกระจายลมร้อนเข้ากับถังอบแห้ง โดยช่องระบายอากาศจะอยู่ส่วนบนสุดของถังอบ ลมร้อนถูกป้อนเข้ามาทางด้านข้างและด้านล่างของถัง อย่างไรก็ตามในโครงการนี้ทางผู้จัดทำได้ทำการปรับปรุงชุดทดลองดังกล่าวโดยทำการเปลี่ยนท่อกระจายลมร้อนจากแบบที่เป็นท่อทรงกระบอกมาเป็นชุดกระจายลมร้อนแบบสี่เหลี่ยมคางหมูติดด้านข้างของถัง เนื่องจากน่าจะทำให้เกิดการกระจายของลมได้ดีกว่า ภายในท่อกระจายลมทำการติดตั้งวาล์วปีกผีเสื้อสำหรับปรับปริมาณลมที่เข้าห้องอบแห้งดังแสดงในรูป 3.2 ส่วนทางด้านล่างของถังจะคงเดิมเป็นท่อกระจายลมทรงกระบอก ที่ผนังด้านข้างของถังอบมีการเจาะรูเพิ่มสำหรับการวัดความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ ในห้องอบ โดยเจาะ 8 ตำแหน่งตามแนวเส้นรอบวง และในแต่ละตำแหน่งมีการเจาะรูรวม 3 รูในแนวตั้งซึ่งทำให้มีรูเจาะรวม 24 รู นอกจากนี้ยังทำการเจาะรูสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อติดตั้งกระจกเพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดตำแหน่งของเครื่องมือวัดความเร็วลมในถังอบ



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองอบแห้งทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

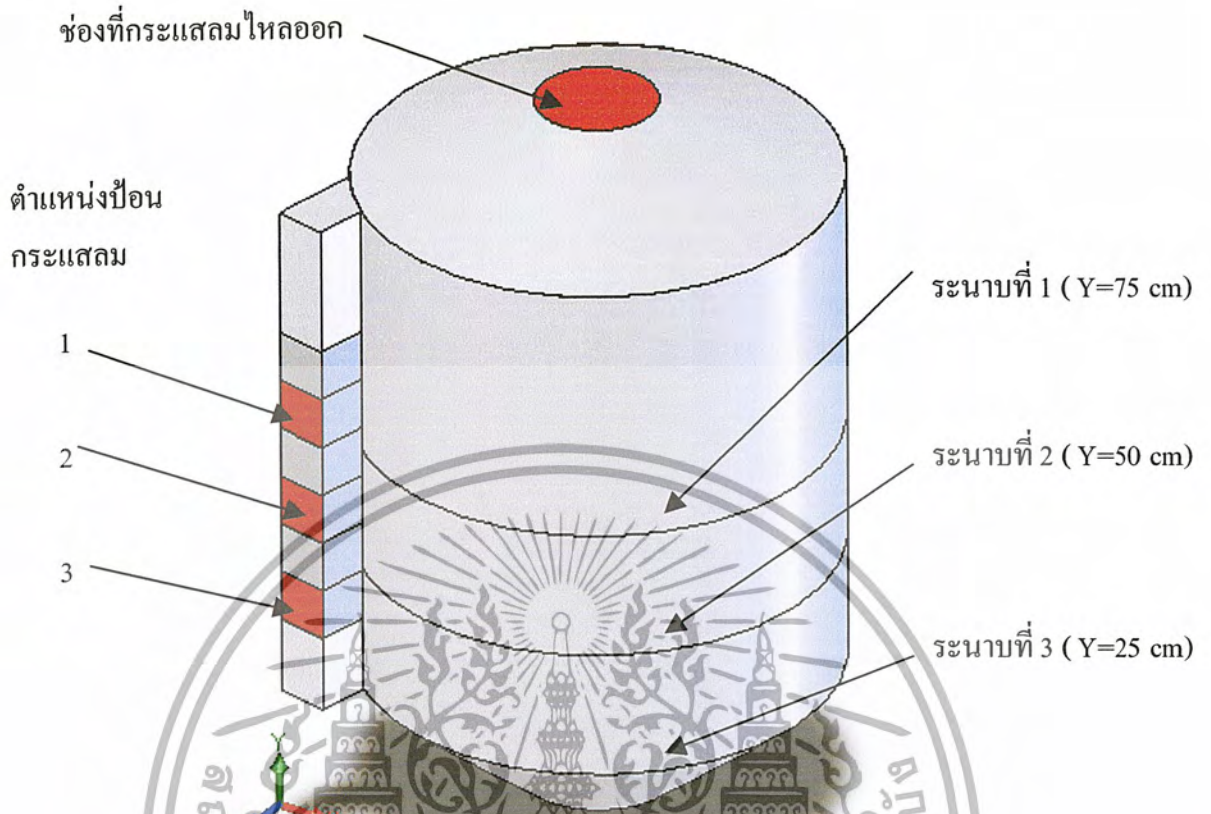


รูปที่ 3.2 ชุดกระจายลมร้อนที่เข้าด้านข้างของห้องอบแห้ง

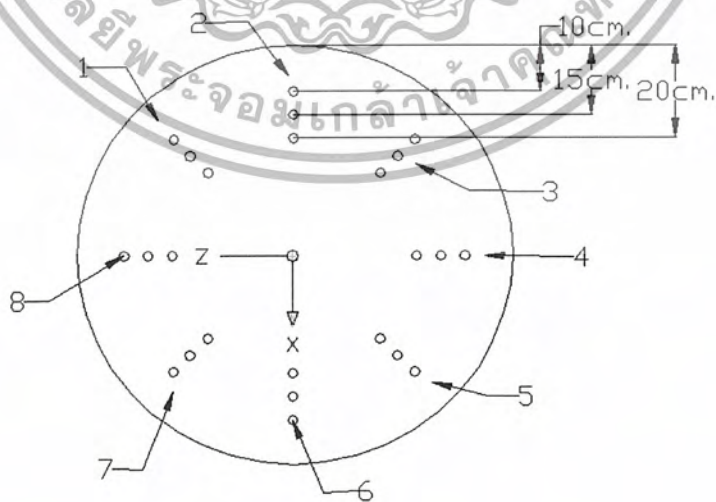
### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การวัดความเร็วลมในห้องอบแห้ง

ทำการเดินเครื่องให้ทำงานโดยเปิดโบลเดอร์ประมาณ 10 นาทีจากนั้นทำการปรับระดับการเปิด-ปิดของวาล์วปีกผีเสื้อ ในท่อกระจายลมด้านข้างของเครื่องอบทั้ง 3 ตำแหน่ง ในความเร็วลมที่ทางออกของท่อกระจายลมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 หลังจากปรับความเร็วลมในเป็นไปในรูปแบบที่กำหนดแล้วก็ทำการวัดลม ณ ตำแหน่งต่างภายในห้องอบ ในแนวตั้งทำการวัดใน 3 ระดับเริ่มต้นที่  $Y = 25$  ซม. และเพิ่มขึ้นอีกระดับ 25 ซม. ดังรูปที่ 3.3 โดยในแต่ละระดับดังกล่าวจะกำหนดวัดความเร็วลมทั้งหมด 24 จุด ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับอุปกรณ์วัดความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นเครื่องมือวัดแบบ Hot-wire anemometer รุ่น Testa 425 สามารถวัดความเร็วลมได้ในช่วง 0-2 เมตร/วินาที และความถูกต้อง  $\pm 0.5$  เมตร/วินาที การวัดความเร็วทำได้โดยค่อยๆ สอดปลายของเครื่องมือเข้าไปในเครื่องอบแล้วค่อยๆ ปรับมุมการวางตัวของก้าน Hot-wire เพื่อที่จะทำให้โดขนาดที่แท้จริง ของความเร็วลม ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยสังเกตค่าที่อ่านได้หากพบว่าเป็นค่าที่สูงสุดก็หยุดการปรับมุม เริ่มทำการอ่านค่าความเร็วเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นบันทึกค่าเฉลี่ย แล้วจึงเริ่มวัดจุดอื่นต่อไปจนครบ 72 จุดต่อหนึ่งรูปแบบการป้อนลม



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่มีการวัดความเร็วลมทั้ง 3 ระนาบ



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

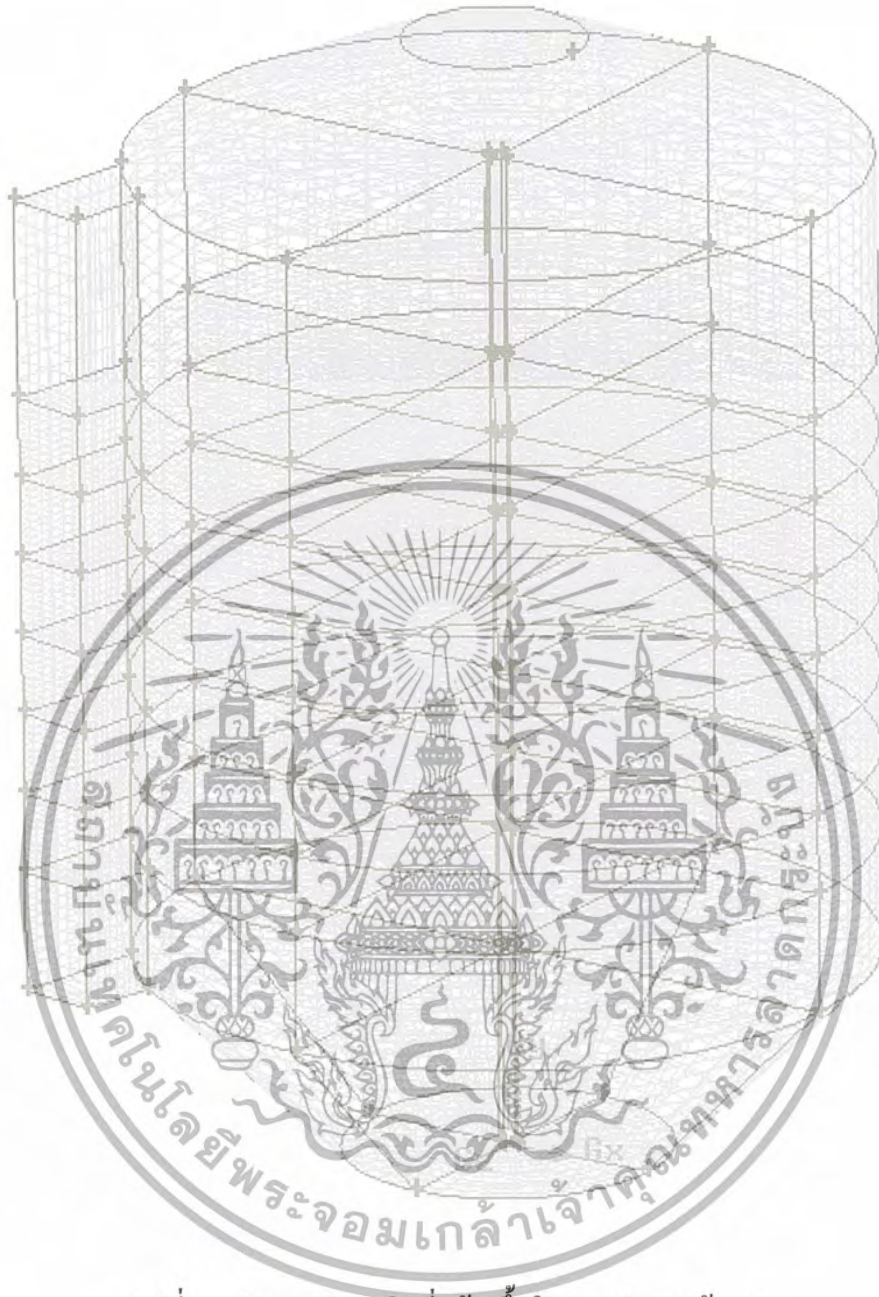
วัดความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังรูป ก.1, ก.2, ก.3 และตาราง ข.1, ข.2, ข.3 (ภาคผนวก)แล้วทำการป้อนลมโดยใช้โบลอเออร์ (Blower) ปรับความเร็วรอบที่ 384 รอบ/นาทีและให้อัตราการป้อนลมในท่อที่ 1, 2, และ 3 และทำการป้อนกระแสลมแบ่งเป็น 2 กรณีดังตารางที่ 3.1 และกำหนดค่าความเร็วกระแสลมเช่นเดียวกันนี้กับการใช้เทคนิค CFD ในการสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการป้อนกระแสลมในห้องอบแห้ง

| ท่อที่      | ความเร็วกระแสลมที่ป้อน ( เมตร/วินาที ) |          |          |
|-------------|--|----------|----------|
|             | ท่อที่ 1                               | ท่อที่ 2 | ท่อที่ 3 |
| รูปแบบที่ 1 | 0.58                                   | 0.56     | 0.53     |
| รูปแบบที่ 2 | 0.41                                   | 0.72     | 1.10     |

### 3.2.2 แบบจำลองการไหลและการคำนวณความเร็วลมโดยเทคนิค CFD

สร้างกริด (grid) ของห้องอบแห้งในรูปของปริมาตรหรือเซลล์เล็กๆ จำนวน 47355 เซลล์ โดยเฉพาะที่บริเวณที่จะทำการประมวลผลความเร็วลมนั้นจะทำการกำหนดขนาดของกริด ให้มีขนาด 10 mm.×10 mm. ดังรูปที่ 3.5 ทำการประมวลผลหาความเร็วลมโดยใช้เทคนิควิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม และกำหนดให้แบบจำลอง มีรูปแบบการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ที่ k-ε model กำหนดความเร็วของทางเข้าของกระแสลมทั้ง 3 ช่อง เลือกใช้ residual ที่  $10^{-5}$  กำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นทุกบริเวณเป็น 0 และทำการกำหนดการคำนวณซ้ำเป็น 1500 รอบ. ในการคำนวณแบบจำลองนี้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางยี่ห้อ AMD รุ่น AthlonXP 2500 เมกกะเฮิร์ต, หน่วยความจำ 512 เมกกะไบต์ และทำการประมวลผลโดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 20 นาทีต่อ 1 สภาวะ



รูปที่ 3.5 ลักษณะของกริดที่สร้างขึ้นในแบบจำลองห้องอบ

### 3.2.3 การเปรียบเทียบค่าความเร็วจากการวัดและการคำนวณโดยเทคนิค CFD

ทำการคำนวณค่าความเร็วลมจากแบบจำลองห้องอบแห่งที่สร้างขึ้น โดยกำหนดให้ความเร็วลมที่ป้อนเข้าท่อกระจายทั้ง 3 เป็นเช่นเดียวกับรูปแบบการป้อนลมดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นทำการบันทึกความเร็วลม ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับการวัดความเร็วลมโดยใช้ Hot-wire anemometer นำค่าความเร็วลมที่ได้จากการวัดและการคำนวณ ไปคำนวณหาค่า Relative Mean Absolute Difference (Nahar et al., 2004) ดังสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{CFD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|U_{CFD}^i - |U_{exp}^i|}{|U_{exp}^i|} \quad (3.1)$$

โดย  $n$  = จำนวนตำแหน่งที่นำมาคำนวณความคลาดเคลื่อน

$U_{CFD}^i$  = ค่าความเร็วลมที่วัดได้จากการคำนวณ โดยเทคนิค CFD

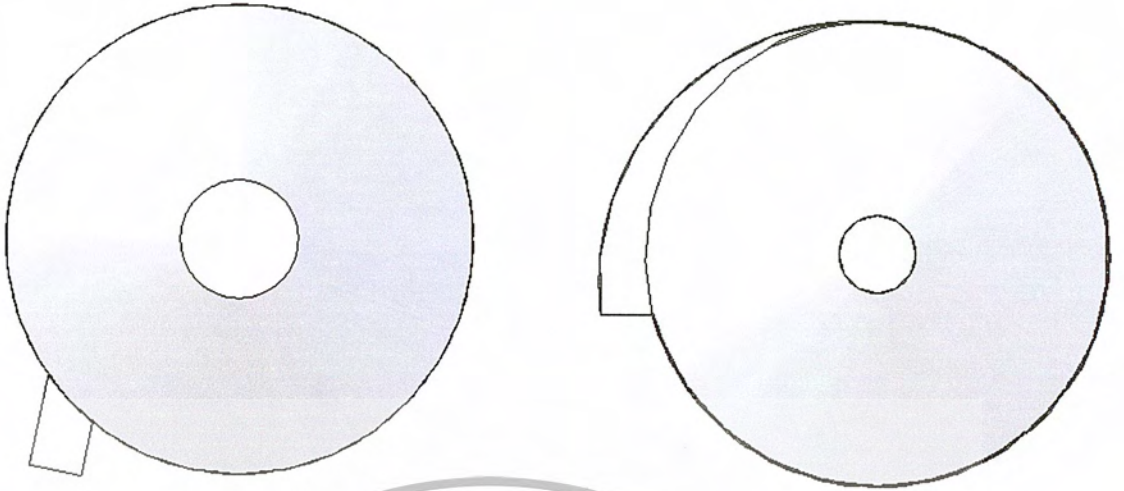
$U_{exp}^i$  = ค่าความเร็วลมที่วัดได้จากเครื่องอบแห้ง

### 3.2.4 การหารูปแบบการป้อนกระแสลมที่เหมาะสม

ทำการคำนวณการไหลของลมภายในแบบจำลองของเครื่องอบแห้งซึ่งมีการปรับทิศทางท่อส่งลมในระนาบ X-Y เป็น 2 กรณีคือในทิศทางของแนวเส้นสัมผัสและในแนวพุ่งเข้าหาใจกลางของของรศมีเครื่องอบแห้ง ดังรูป 3.6 โดยในแต่ละกรณีก็มีการป้อนปรับปรุงแบบการป้อนลมทั้งสิ้น 4 รูปแบบดังตารางที่ 3.2 รวมการคำนวณการไหลทั้งหมด 8 ศักยะ จากนั้นวิเคราะห์หารูปแบบการป้อนลมที่ทำให้การกระจายตัวของกระแสลมอย่างสม่ำเสมอ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเป็นเกณฑ์

ตารางที่ 3.2 การป้อนลมใน 4 กรณี

|                    | ความเร็วกระแสลมที่ป้อน ( เมตร/วินาที ) |          |          |
|--------------------|--|----------|----------|
|                    | ท่อที่ 1                               | ท่อที่ 2 | ท่อที่ 3 |
| รูปแบบการป้อนที่ 1 | 0.57                                   | 0.57     | 0.57     |
| รูปแบบการป้อนที่ 2 | 0.56                                   | 0.57     | 0.58     |
| รูปแบบการป้อนที่ 3 | 0.56                                   | 0.58     | 0.60     |
| รูปแบบการป้อนที่ 4 | 0.56                                   | 0.60     | 0.64     |



รูปที่ 3.6 ทิศทางการป้อนกระแสดวงเข้าตรงกลาง  
ห้องอบแห้ง

รูปที่ 3.7 ทิศทางการป้อนลมเข้าเส้นสัมผัส  
ของห้องอบแห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบค่าความเร็วลมจากการคำนวณและการวัดจริงกระทำเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากเทคนิค CFD

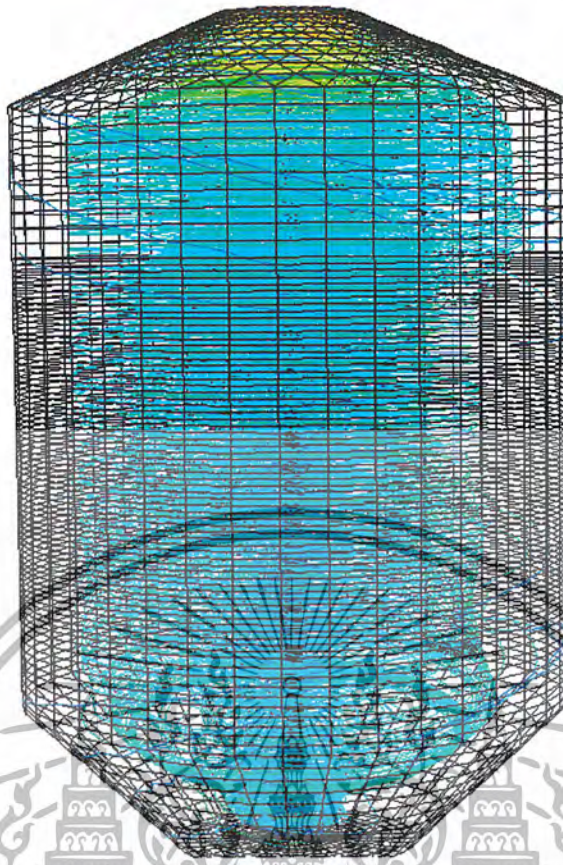
### 4.1 ลักษณะการไหลของกระแสลมภายในห้องอบแห้ง

#### 4.1.1 เส้นทางไหลของกระแสลม

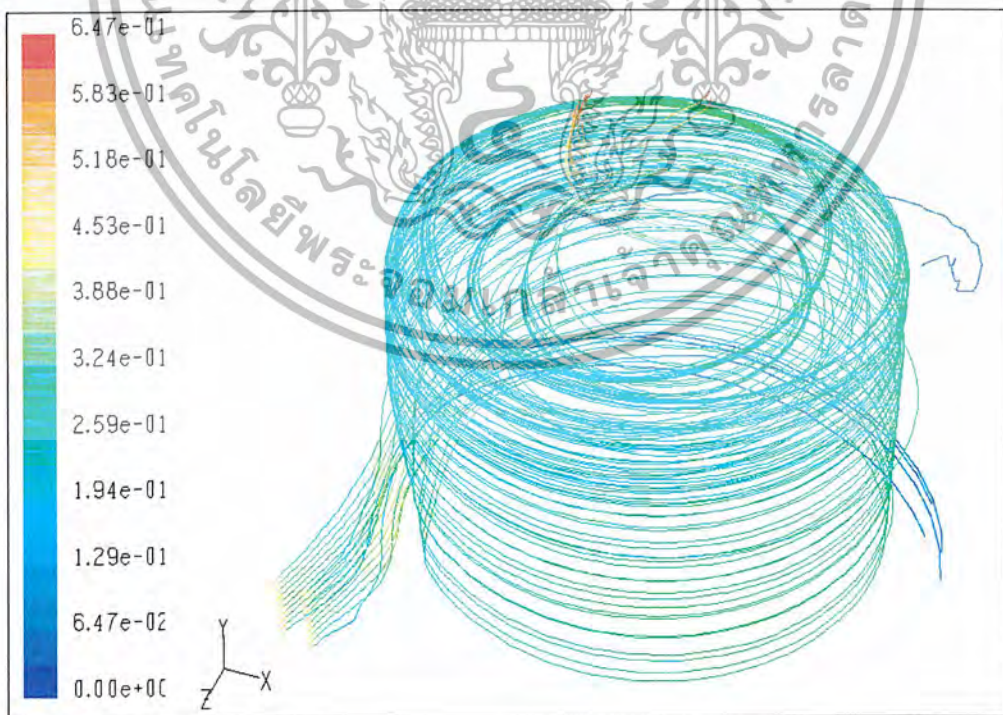
โดยทั่วไปกระแสลมที่ออกจากปลายท่อกระจายลมจะไหลไปตามเส้นคังของผนังห้องอบแห้ง และค่อยไหลวนขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรกเมื่อกระแสลมไหลวนขึ้นในระดับหนึ่งรัศมีของเส้นทางไหลจะค่อยลดลงในขณะที่ความเร็วลมในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดรัศมีการเคลื่อนที่จะมีขนาดเล็กที่สุดที่บริเวณช่องระบายที่ส่วนบนสุดของห้องอบแห้งซึ่งบริเวณที่มีค่าความเร็วลมสูงสุด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 จะได้ว่าแนวเส้นทางไหลของกระแสลมในห้องอบแห้งมีรูปร่างเหมือนกรวยคว่ำซึ่งน่าจะเกิดจากที่บริเวณส่วนบนของห้องอบแห้งมีมวลของอากาศที่มีความหนาแน่นเนื่องจากการไหลเวียนน้อยมาจากรูปที่ 4.2 ดังนั้นเมื่อมีกระแสลมจากท่อด้านบนสุดไหลวนขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้งจึงถูกบังคับให้ไหลไปในส่วนกลางของห้องอบแห้งซึ่งมีมวลอากาศเบาบางและออกสู่บรรยากาศภายนอกในที่สุดทั้งนี้ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นก็เป็นไปในแนวทางเดียวกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) นั่นคือกรณีของไหลไม่มีการอัดตัว เมื่อพื้นที่หน้าตัดของการไหลลดลงความเร็วในการไหลจะเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสลมจากท่อที่ 2 จะคล้ายกับท่อที่ 1 นั่นคือจะไหลวนเป็นเกลียวขึ้นสู่ด้านบนโดยรัศมีเกลียวจะเล็กลงเรื่อยๆ เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากมวลอากาศที่มีอยู่อย่างหนาแน่นในแนวเส้นการเคลื่อนที่ของลมในท่อแรก ในลักษณะเดียวกันกระแสลมที่ถูกป้อนจากท่อที่ 3 ซึ่งอยู่ด้านล่างสุดก็ได้รับอิทธิพลจากมวลอากาศในแนวเส้นทางไหลจากท่อที่ 2 ทำให้แนวเส้นการไหลของกระแสลมมีลักษณะคล้ายกับแนวคังกล่าวของกระแสลมจากท่อที่ 2 ดังนั้นเมื่อมองภาพโดยรวมแล้วจะพบว่าเส้นการไหลของกระแสลมจากท่อป้อนลมทั้ง 3 จะมีลักษณะเหมือนรูปกรวยคว่ำซ้อนกัน

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของการวางวัสดุอบแห้งไม่ควรที่จะวางใกล้กับขอบของห้องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพราะเป็นบริเวณที่ไม่ค่อยมีการถ่ายเทความมวลอากาศ นอกจากนี้ควรมีการเพิ่มท่อป้อนลมทางด้านข้างถัดลงมาจาท่อที่ 3 ซึ่งน่าจะจะทำให้การกระจายตัวของลมที่บริเวณด้านล่างของถังได้ดีขึ้นคล้ายกับเพิ่มรูปทรงกรวยคว่ำเข้าไปที่ชั้นล่างสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

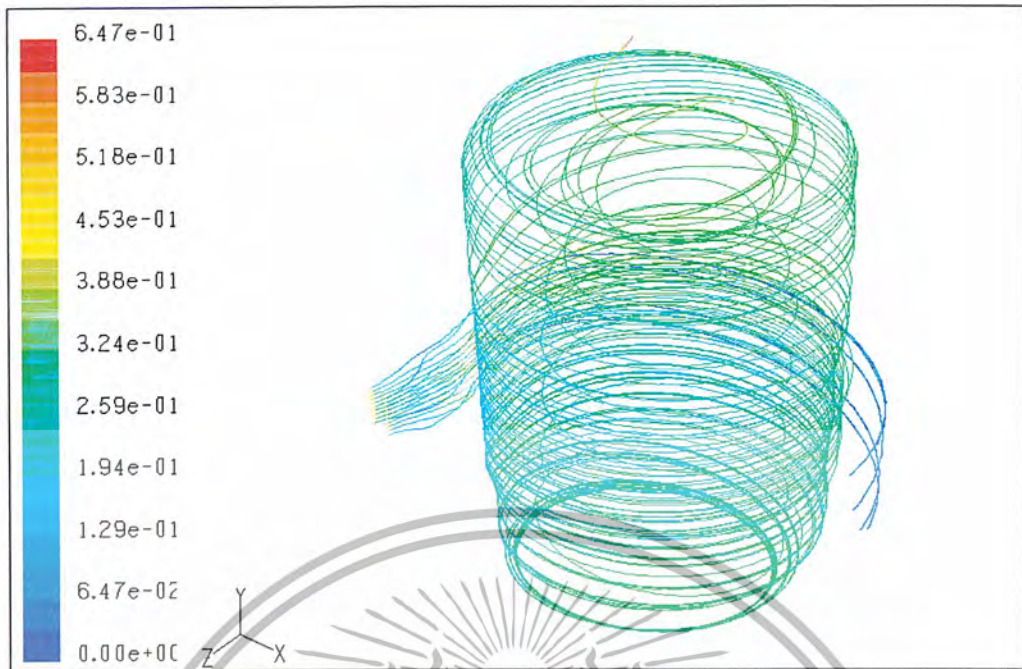


รูปที่ 4.1 บริเวณส่วนบนของถังอบที่มีการไหลเวียนของลมน้อย

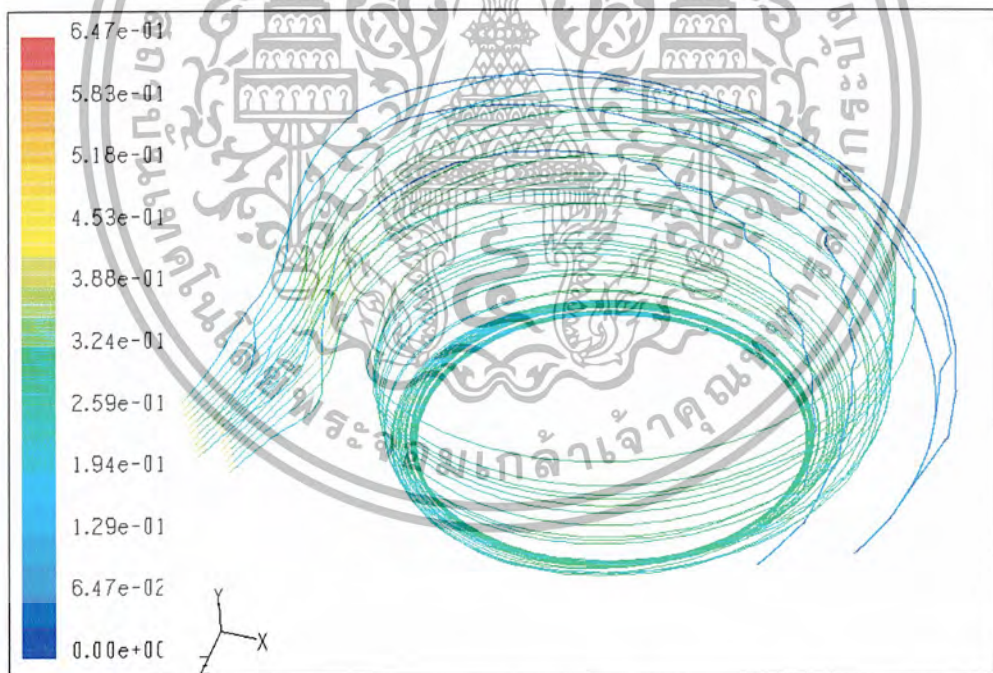


รูปที่ 4.2 เส้นทางการไหลของกระแสลม (Velocity Magnitude) จากช่องทางเข้าที่ 1 (Y = 75 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การไหลของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 2 (Y = 50 cm.)

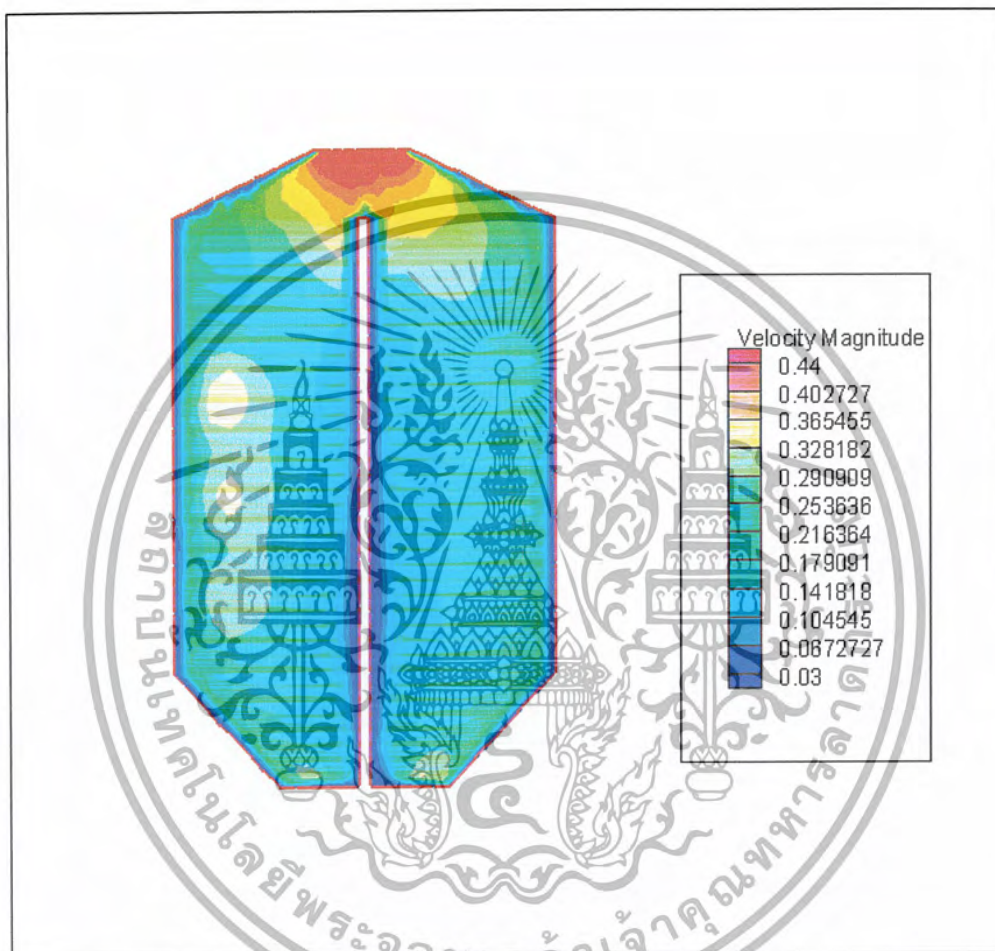


รูปที่ 4.4 การไหลของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 3 (Y = 25 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

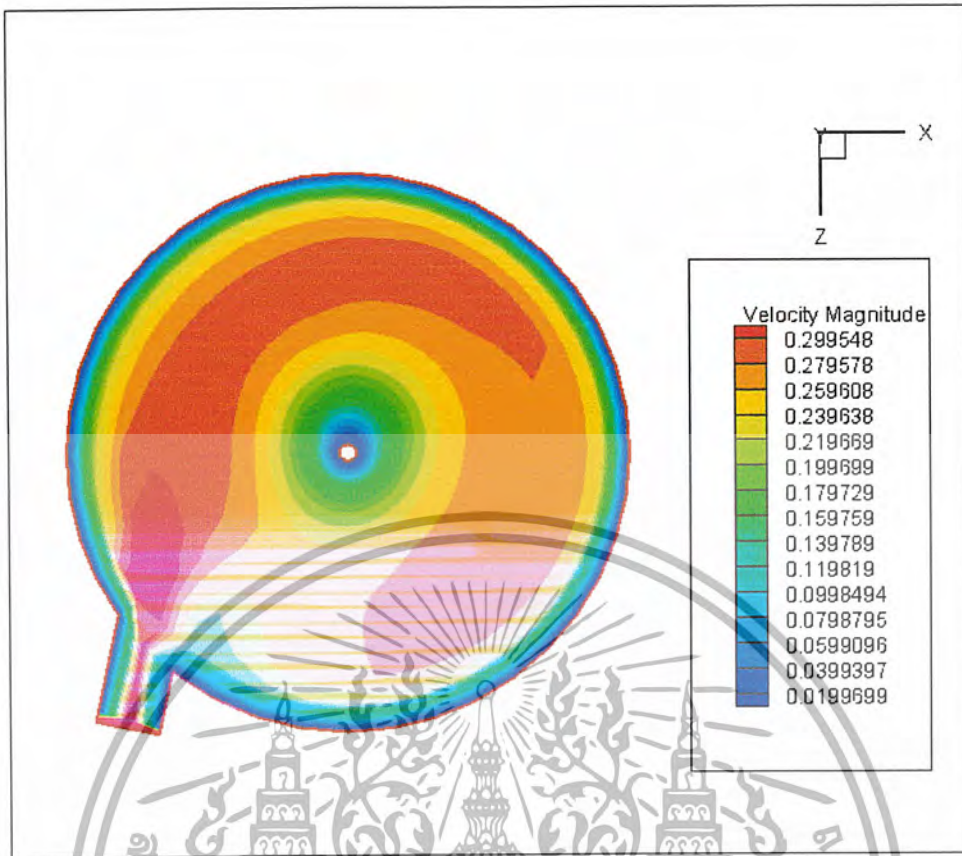
#### 4.1.2 การกระจายตัวของกระแสมในระนาบ X-Z

เมื่อมาพิจารณาการกระจายตัวของกระแสม นั้นพบว่าเมื่อพิจารณาในระนาบ X-Z มีการกระจายความเร็วของกระแสมที่สม่ำเสมอ จะมีความเร็วของกระแสมที่มากบริเวณทางเข้าทั้ง 3 และทางออก ด้านบนดังรูปที่ 4.5



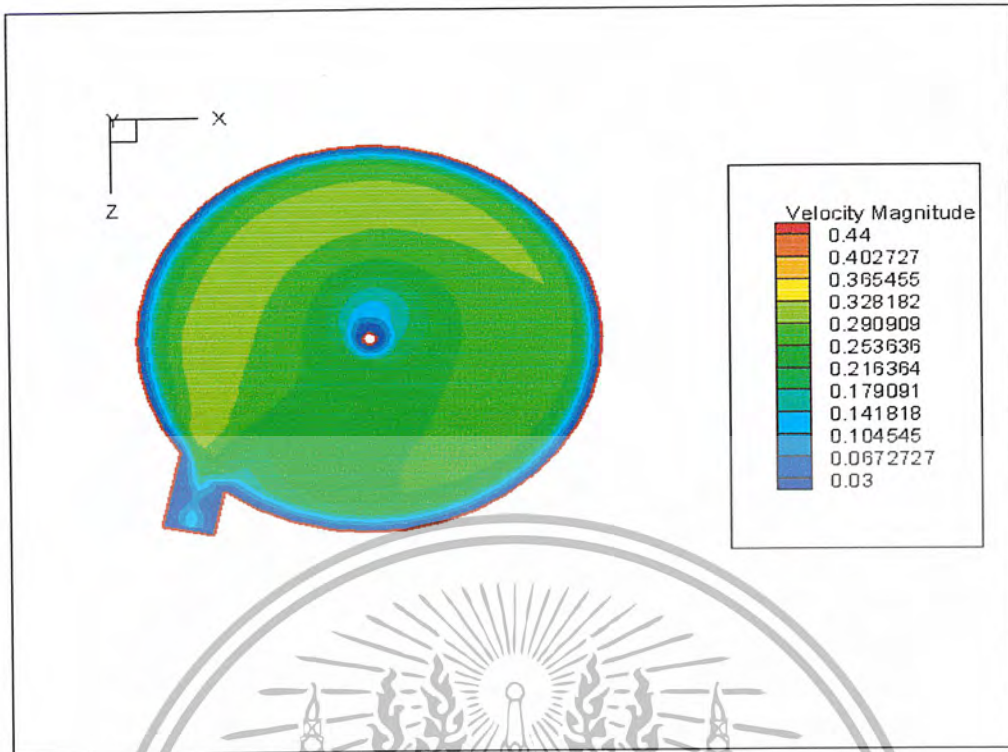
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของกระแสม (Velocity Magnitude) บนระนาบ X-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

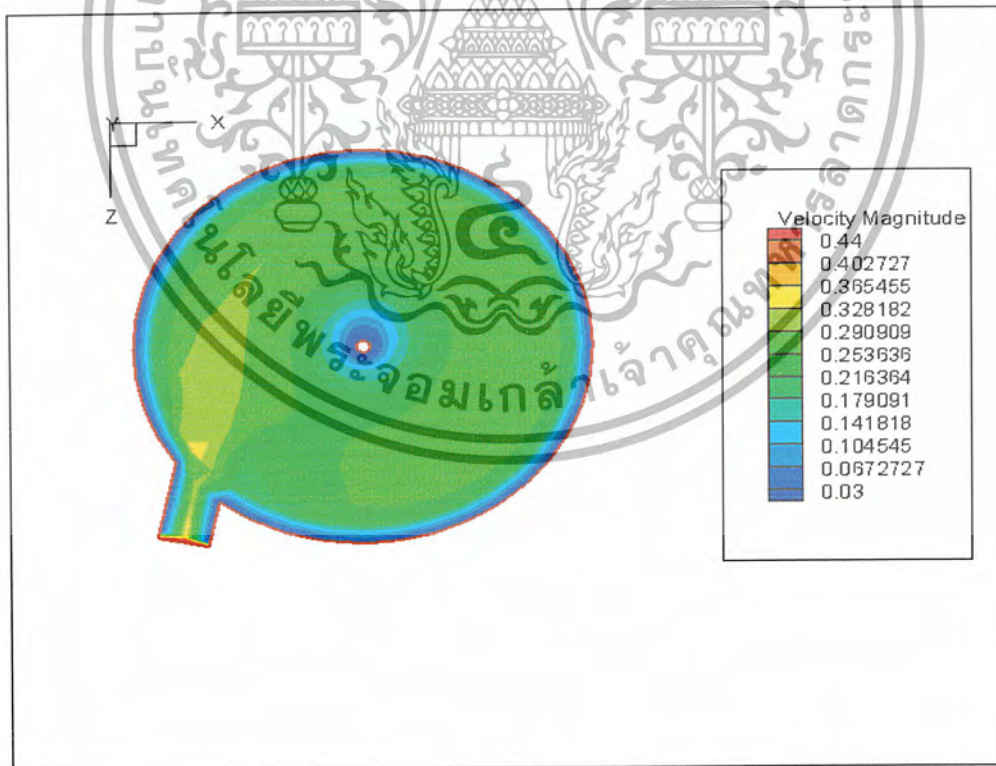


รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ในระนาบ X-Z

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสลมไหลเข้าไปในห้องอบแห้งแล้วนั้น บริเวณด้านทางเข้าจะมีการกระจายของกระแสของลมที่มาก จนกระทั่งเมื่อกระแสลมเคลื่อนที่ไปปะทะผนังห้องอบแห้งแล้วนั้นพบว่ากระแสความเร็วลมที่ไหลนั้นจะมีความเร็วที่ลดลง และบริเวณช่องทางเข้าที่ 1 รูปที่ 4.7 พบว่าการกระจายความเร็วของกระแสลมนั้นมีการเคลื่อนที่เข้าห้องอบแห้งกระแสของลม บางส่วนนั้นจะมีการไหลไปที่บริเวณของผนังก่อนจึงทำให้ความเร็วมีค่าลดลงและจะไปมีค่าที่มากบริเวณที่ผิวผนังโดยกระแสของลมปะทะโดยตรงและเคลื่อนที่ไปตามลักษณะของห้องอบแห้ง โดยที่ความเร็วของกระแสลม นั้นจะมีค่าที่ลดลงเรื่อยตามระยะทาง ส่วนทางเข้าที่ 2 จะพบว่าความเร็วของกระแสลม มีลักษณะการไหลที่คงเหมือนกับช่องทางเข้าที่ 1 แต่จะแตกต่างกันตรงค่าความเร็วของกระแสลมที่ป้อนเข้าไปในช่องนั้นๆ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 1 ( $Y = 75$  cm.)

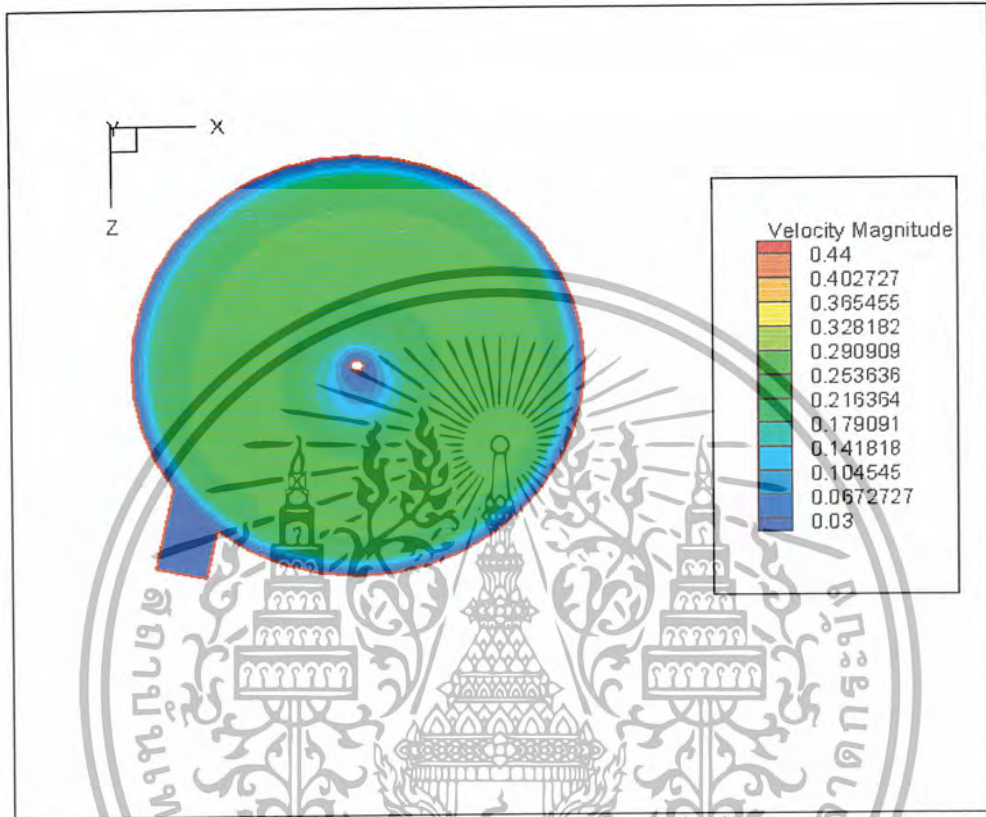


รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 2 ( $Y = 50$  cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสของลมที่ช่องทางเข้าที่ 3 นั้นพบว่ามีกระแสกระจายตัว อย่างเห็นได้ชัดว่า มีความสม่ำเสมอกัน ทุกๆ บริเวณของระนาบ X-Z ที่  $Y = 25$  cm โดยที่บริเวณของผนังห้องอบจะมีความเร็วของกระแสลมที่เบาบางมาก เนื่องจากการป้อนลมไม่ได้กำหนดให้กระแสมีทิศทางสัมพันธ์กับผิวผนังห้องอบ ดังรูปที่

4.9



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของกระแสลม (Velocity Magnitude) ที่ช่องทางเข้าที่ 3 ( $Y = 25$  cm.)

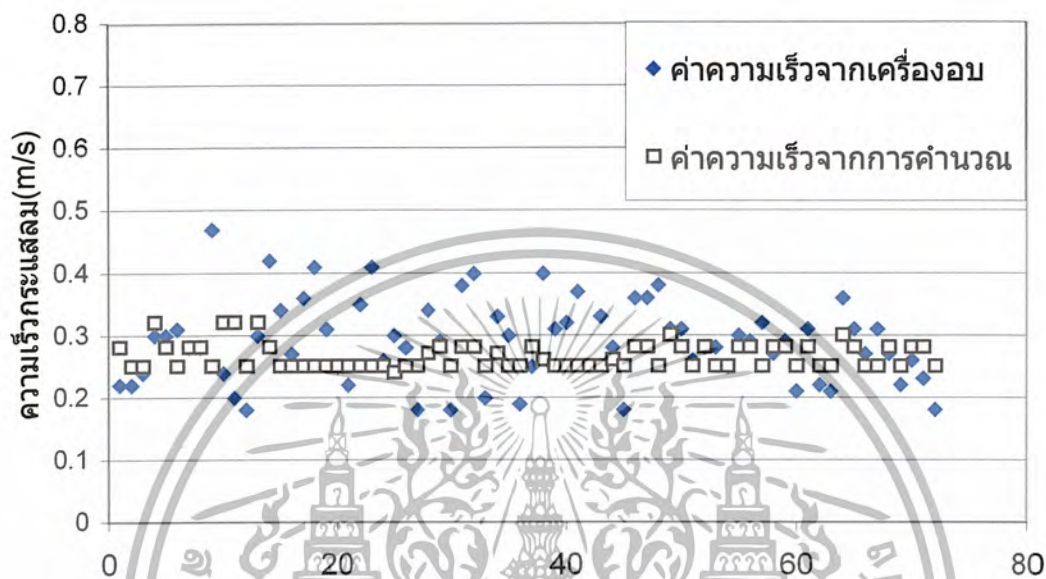
#### 4.2 ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณความเร็วลมจากแบบจำลองโดยเทคนิค CFD

ค่าความเร็วของกระแสลมที่ได้จากการคำนวณและการวัดค่าจริงทั้ง 2 กรณีแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ค่าเฉลี่ยที่วัดจริงจะมีค่าที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ (สมการ 3.1) ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าที่ได้จากการวัดจริงนั้นเป็นค่าที่เกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัดความเร็วของกระแสลมดังรูปที่ 4.10 ซึ่งพิกัดของจุดต่างๆ บนกราฟสามารถดูได้จาก ภาคผนวก ก และ ข โดยพบว่าจุดที่มีค่าผิดพลาดมากนั้น อยู่ใกล้ช่องทางเข้าของกระแสลม เพราะลมที่ออกมาจากช่องป้อนลมอยู่ใกล้วาล์วปีกผีเสื้อส่งผลทำให้กระแสลมที่ออกมามีความแปรปรวนอยู่ค่อนข้างมาก จึงอาจทำให้เกิดความผิดพลาดคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็วกระแสลมที่บริเวณนั้น ได้ โดยที่ กรณีที่ 1 ความคลาดเคลื่อนจะอยู่ระหว่าง 31% ถึง 43.4% และความคลาดเคลื่อนจะเกิดมากที่สุดที่ระนาบบนของถังอบแห้ง และกรณีที่ 2 ความคลาดเคลื่อนจะอยู่ระหว่าง 2.61% ถึง 17.3% และความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดจะอยู่ที่ระนาบกลาง โดยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของ

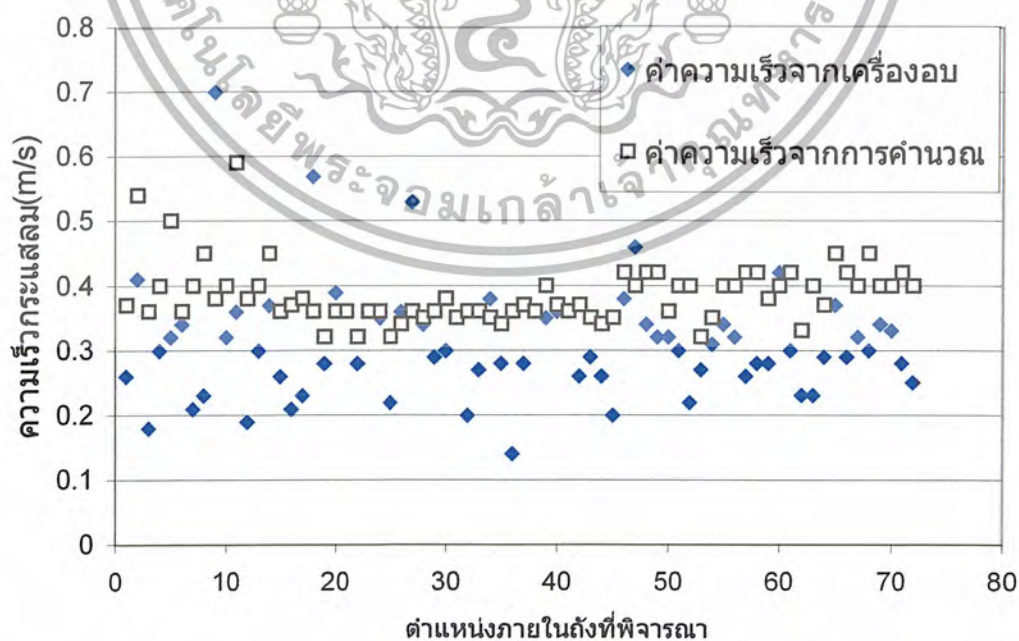
กรณีที่ 1 เท่ากับ 35.53% และกรณีที่ 2 ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับ 6.67% จากรูปที่ 4.10 พบว่ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่จากถังอบแห้งอันเนื่องมาจาก กระทบที่ออกมาจากช่องทางเข้านั้นอยู่ใกล้ วาล์วปีกผีเสื้อ จึงมีผลทำให้ความเร็วลมที่วัดได้จริงนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้นมาได้ ส่วนในกรณีที่ 2 พบว่าความผิดพลาดยังคงมีความผิดพลาดในลักษณะเดียวกันกับกรณีที่ 1 อันเนื่องมาจากความเร็วที่ใกล้ วาล์ว ปีกผีเสื้อ



รูปที่ 4.10 ค่าความเร็วลมจากการวัดและการคำนวณ ณ จุดต่างๆ ในรูปแบบการป้อนที่ 1



รูปที่ 4.11 ค่าความเร็วลมจากการวัดและการคำนวณ ณ จุดต่างๆ ในรูปแบบการป้อนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมจากการคำนวณและจากการวัดกรณีป้อนลมในรูปแบบที่ 1

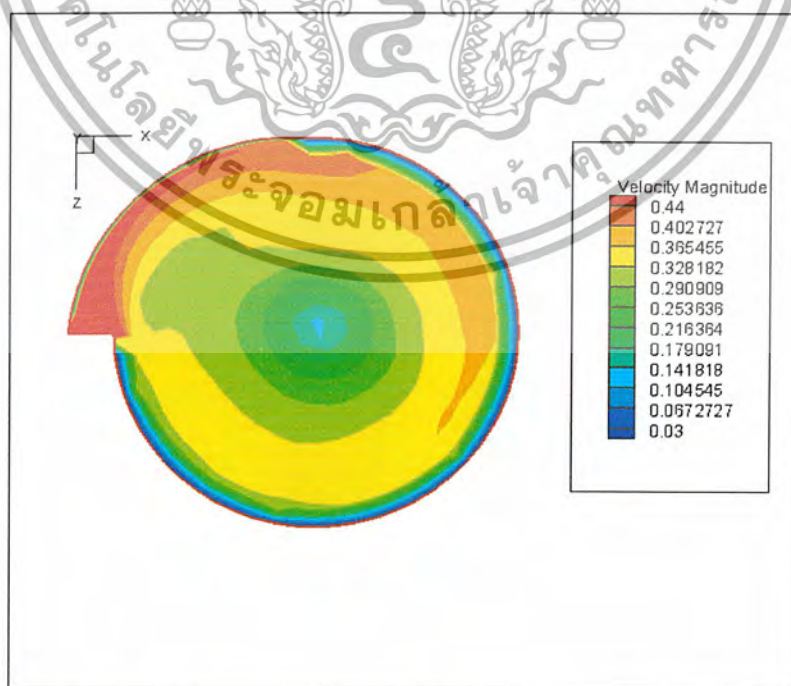
|                             | ระนาบ     |           |           |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                             | Y = 75 cm | Y = 50 cm | Y = 25 cm |
| ความเร็วลมจากการวัด (m/s)   | 0.30      | 0.30      | 0.26      |
| ความเร็วลมจากการคำนวณ (m/s) | 0.28      | 0.27      | 0.25      |
| ความผิดพลาด ( $E_{CFD}$ )   | 15.00%    | 17.30%    | 2.61%     |

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความเร็วลมจากการคำนวณและการวัดค่าจริงกรณีที่ 2

|                             | ระนาบ     |           |           |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                             | Y = 75 cm | Y = 50 cm | Y = 25 cm |
| ความเร็วลมจากการวัด (m/s)   | 0.30      | 0.31      | 0.32      |
| ความเร็วลมจากการคำนวณ (m/s) | 0.40      | 0.40      | 0.38      |
| ความผิดพลาด ( $E_{CFD}$ )   | 43.40%    | 32.20%    | 31.00%    |

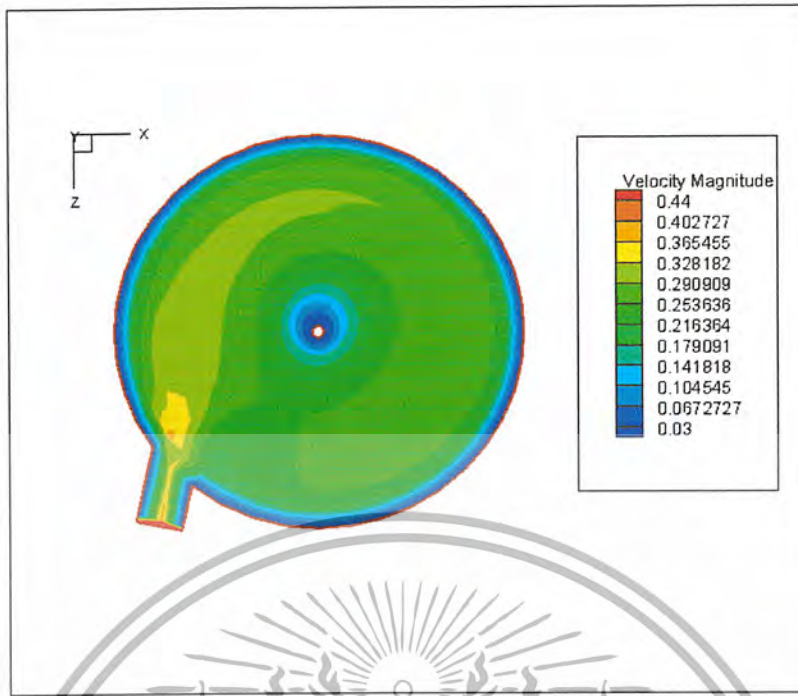
#### 4.3 อิทธิพลของทิศทางการป้อนลมต่อการกระจายตัวของกระแสลมในห้องอบ

จากการตรวจสอบความถูกต้องโดยหาค่า Relative Mean Absolute Difference (Nahar et al., 2004) พบว่ากรณีที่ 1 มีค่า 18.35% และกรณีที่ 2 มีค่า 35.59% ซึ่งกรณีที่ 1 มีค่าน้อยกว่า จึงนำกรณีที่ 1 มาใช้ศึกษาอิทธิพลของทิศทางการป้อนลม ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 ทิศทางการป้อนกระแสลมแบบพุ่งเข้าด้านข้างห้องอบแห้ง (Y=50 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

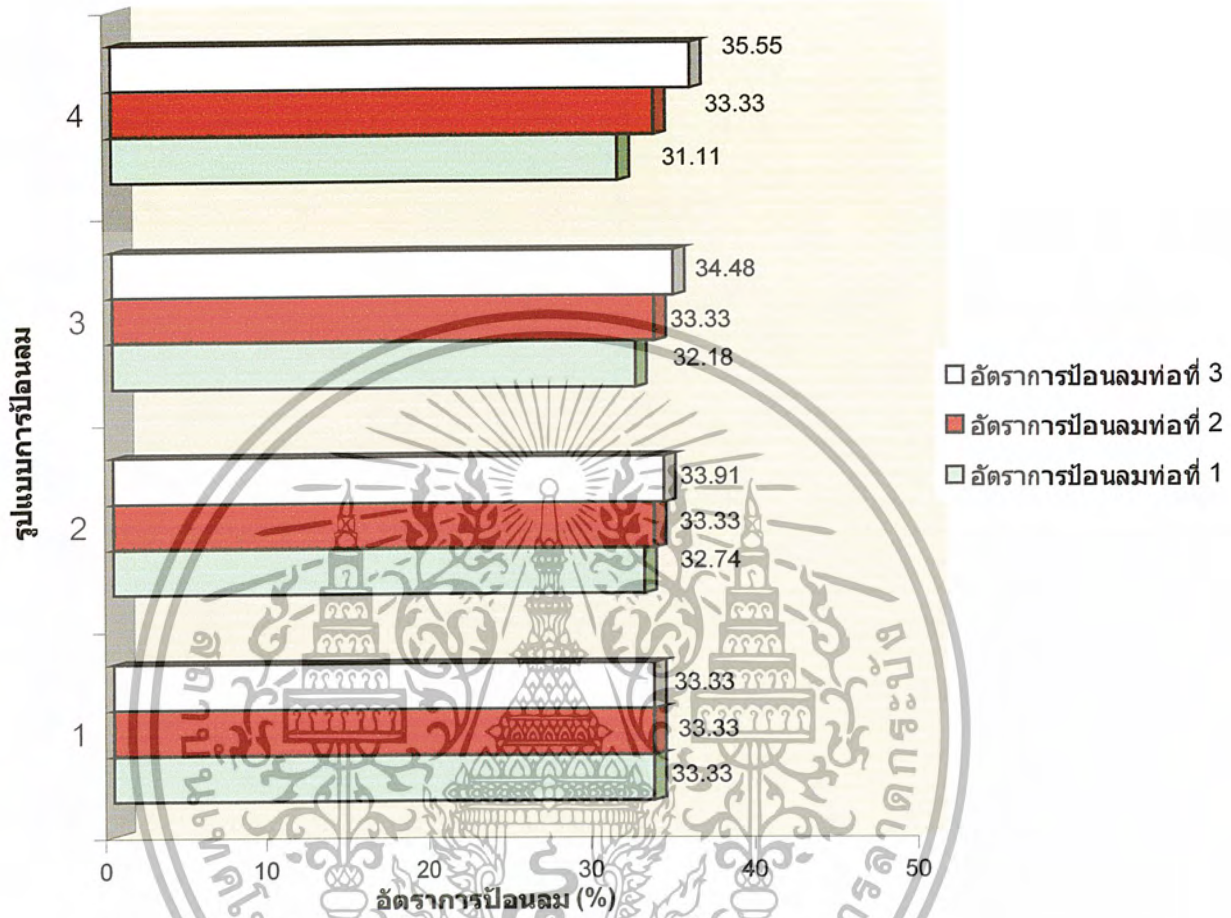


รูปที่ 4.13 ทิศทางป้อนกระแสลมแบบพุ่งตรงห้องอบแห้ง (Y=50 cm.)

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าที่บริเวณผนังของห้องอบแห้ง จะมีความเร็วที่สูง และจะลดลงเรื่อยๆ ตามระยะที่เคลื่อนที่ไป โดยที่กระแสนั้นจะมีการกระจายตัวอยู่เป็นบริเวณรัศมีที่เท่ากันและความเร็วของกระแสลมที่ระดับรัศมีน้อยนั้นจะมีความเร็วที่น้อยกว่าและจากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าความเร็วที่เข้าห้องอบแห้งนั้นมีความเร็วที่สูงแค่ช่วงทางเข้าเท่านั้น เป็นผลมาจากการที่กระแสลมเข้ามาในห้องอบแห้งนั้นไม่มีการบังคับทิศทางเหมือนกับรูปที่ 4.12 จึงทำให้ความเร็วของกระแสลมนั้นสามารถกระจายตัวได้อย่างอิสระ และมีความสม่ำเสมอที่แนวรัศมีในทุกๆระยะที่ดีกว่า มีความแปรปรวนของกระแสลมที่ระยะต่างๆ น้อยกว่าการป้อนลมจากด้านข้างที่สัมผัสผิวห้องอบแห้ง แต่มีข้อเสียคือความเร็วของกระแสลมนั้นจะมีค่าที่น้อยกว่าการป้อนแบบด้านข้างอยู่เล็กน้อย

#### 4.4 อิทธิพลของรูปแบบการป้อนลมต่อการกระจายตัวของกระแสลมในห้องอบแห้ง

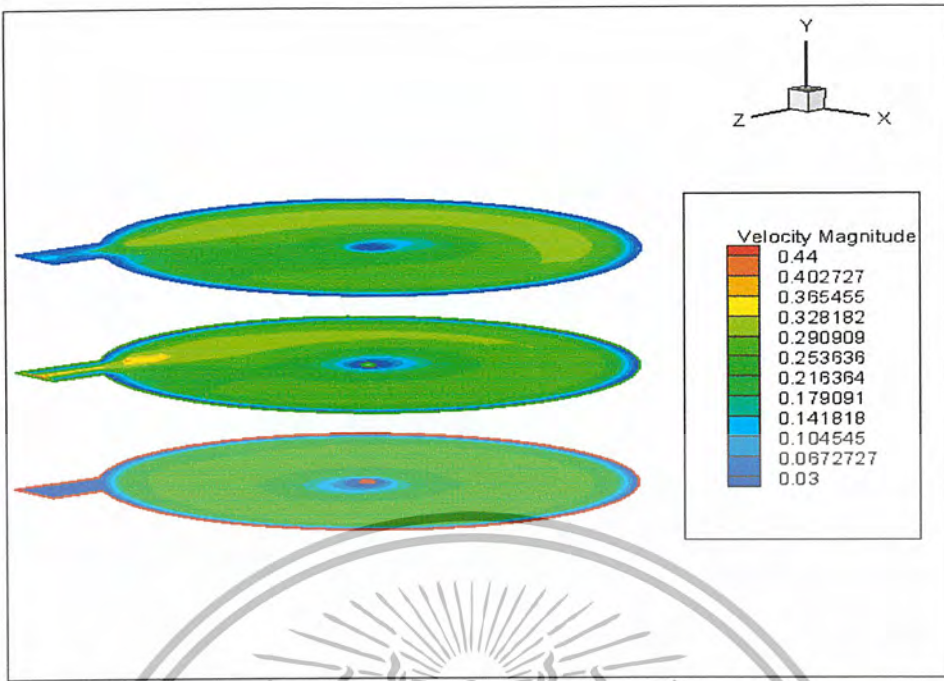
จากการที่ได้ทดลองพบว่าการป้อนลมที่เป็นในลักษณะของป้อนกระแสลมแบบพุ่งตรงห้องอบแห้ง จะให้ความสม่ำเสมอที่ดีกว่า ส่วนอีกปัจจัยที่ศึกษาคือ รูปแบบของการป้อนความเร็วของกระแสลมมีผลต่อการกระจายตัวของกระแสลมภายในห้องอบแห้งดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 รูปแบบการป้อนลมเข้าห้องอบ

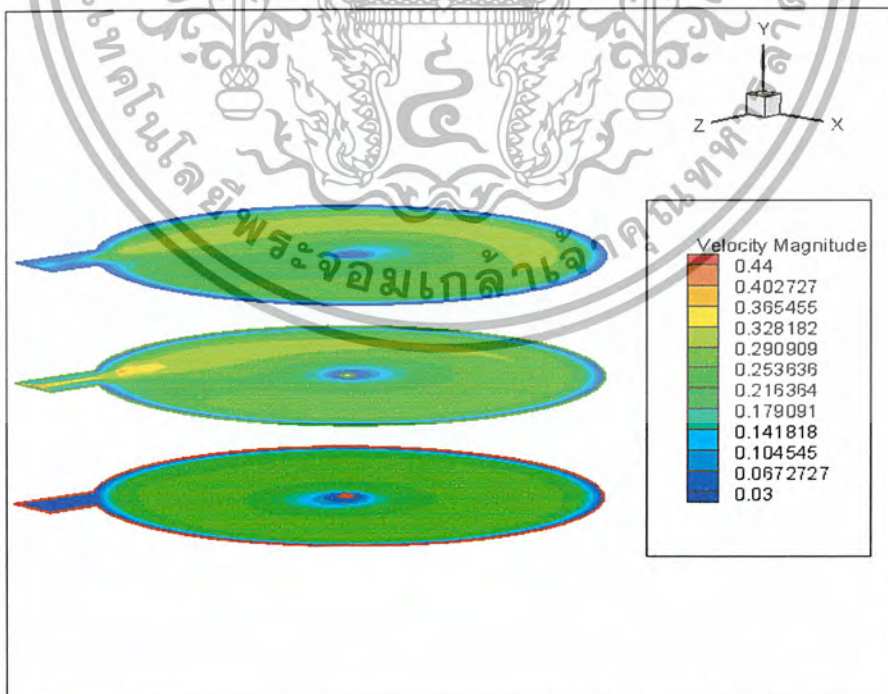
จากกรณีที่ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วลมเท่ากับ 0.28 เมตร/วินาที ความเร็วสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.34 และ 0.2 เมตร / วินาทีตามลำดับ โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0240 และเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 8.576% ดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 1

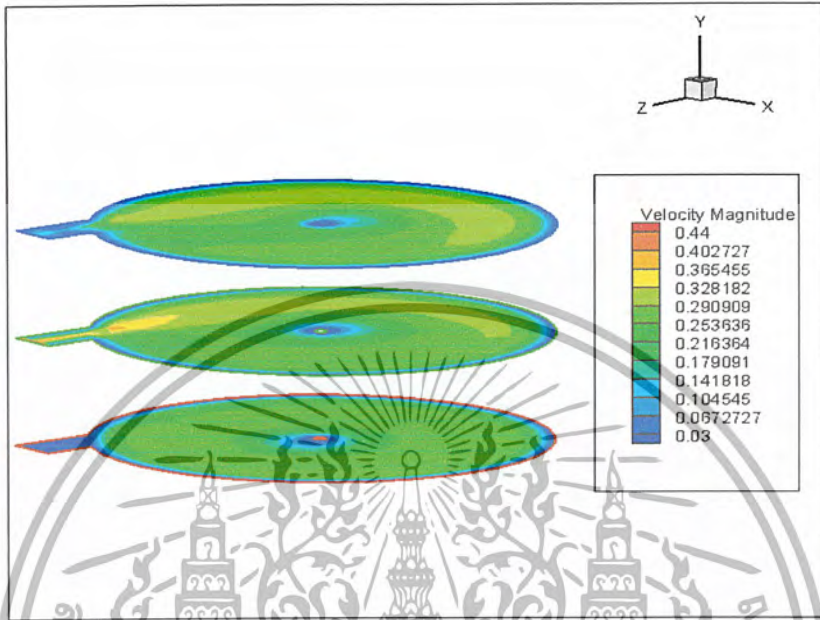
กรณีที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วลมเท่ากับ 0.278 เมตร/วินาที ความเร็วสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.34 และ 0.23 เมตร / วินาทีตามลำดับ โดยค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0220 และเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 7.905% ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 2

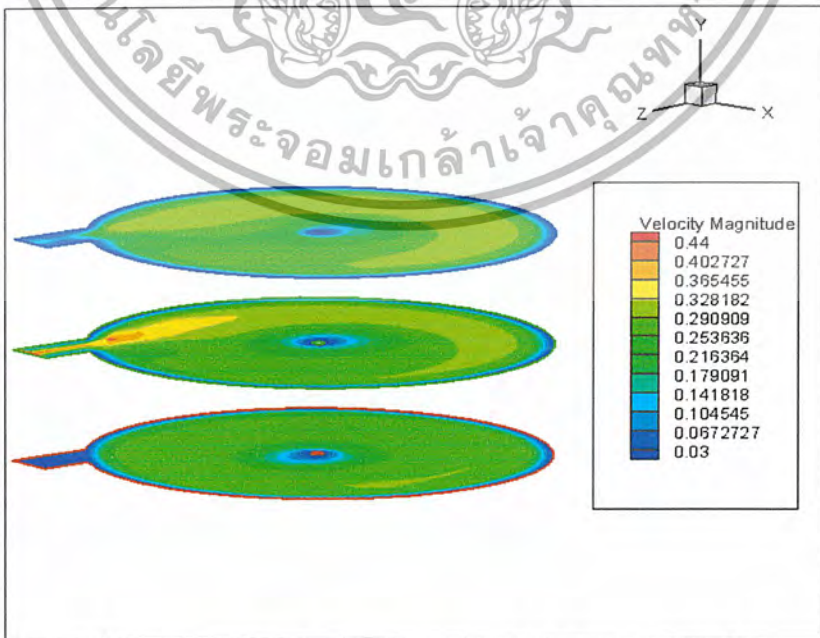
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3 พบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วลมเท่ากับ 0.28 เมตร/วินาที ความเร็วสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.36 และ 0.23 เมตร / วินาทีตามลำดับ โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.02285 และเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 8.150% ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 3

กรณีที่ 4 พบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วลมเท่ากับ 0.294 เมตร/วินาที ความเร็วสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.38 และ 0.18 เมตร / วินาทีตามลำดับ โดยค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0253 และเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 8.626 % ดังรูปที่ 4.18. และแสดงค่าดังตารางที่ 4.3



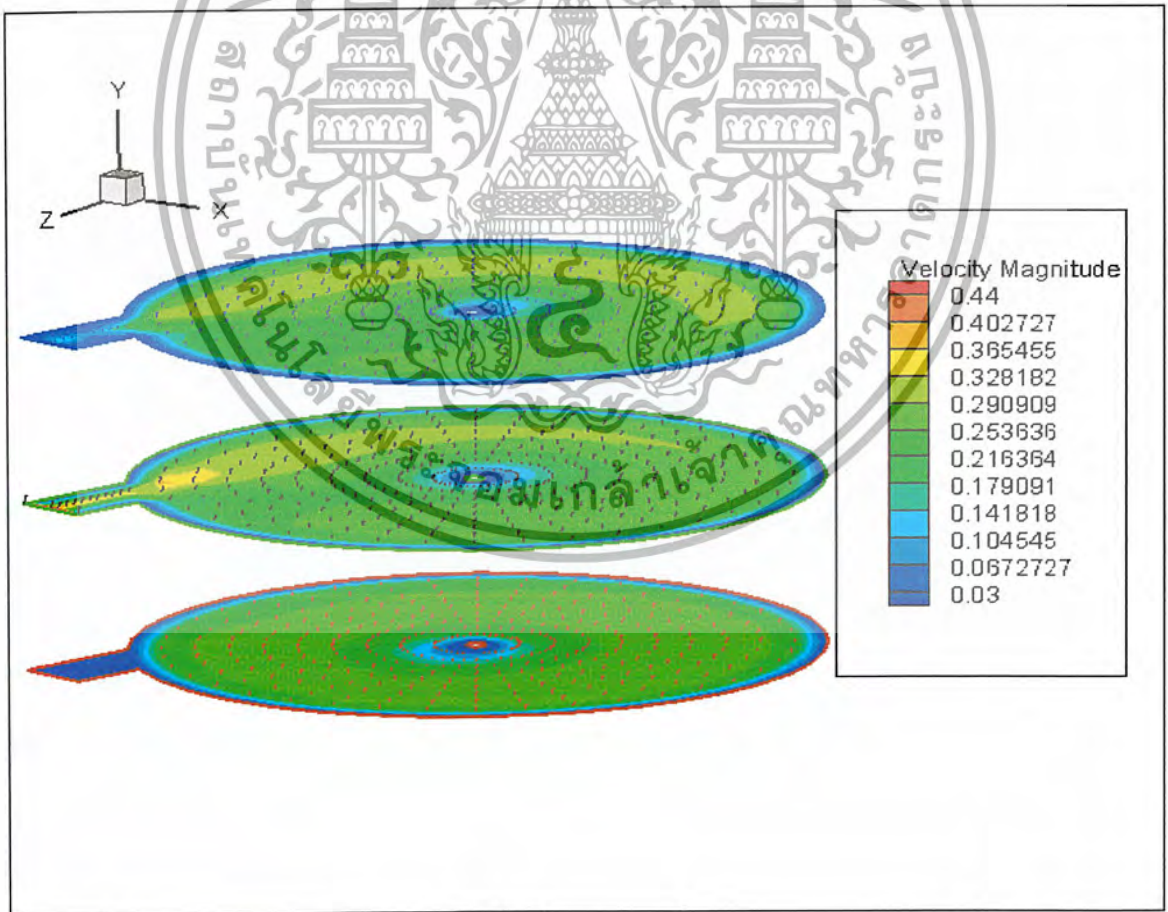
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของกระแสลมที่มีรูปแบบการป้อนที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เปรอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของแต่ละกรณี

| รูปแบบ<br>ที่ | ความเร็วสูงสุด<br>(m/s) | ความเร็วต่ำสุด<br>(m/s) | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน<br>(m/s) | สัมประสิทธิ์<br>ความแปรปรวน (%) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1             | 0.34                    | 0.20                    | 0.0240                        | 8.576                           |
| 2             | 0.34                    | 0.23                    | 0.0220                        | 7.905                           |
| 3             | 0.36                    | 0.23                    | 0.0228                        | 8.150                           |
| 4             | 0.38                    | 0.18                    | 0.0253                        | 8.626                           |

จากตารางดังที่แสดงจะเห็นได้ว่ารูปแบบการป้อนลมพุ่งเข้าหาบริเวณส่วนกลางของรัศมีห้องอบแบบที่ 2 ซึ่งมีการป้อนอัตราการไหลของลม 32.74%, 33.33%, 33.91% จะให้ค่า เปรอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่น้อยที่สุดคือ 7.905% กรณีนี้จึงควรนำไปใช้ในการออกแบบ ดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าการไหลของกระแสลมจะเคลื่อนที่กันอย่างสม่ำเสมอและมีการกระจายตัวของกระแสลมที่เท่าๆ กันทุกบริเวณ



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของกระแสลมที่สม่ำเสมอมากที่สุดจากการออกแบบการป้อนอัตราการ

ไหลของกระแสลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

เทคนิค CFD มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบเครื่องอบแห้ง สามารถช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในขั้นตอนของการพัฒนาได้เป็นอย่างมาก จากการนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์การไหลภายในเครื่องอบแห้งทรงกระบอก สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การไหลของกระแสลมภายในห้องอบแห้งมีลักษณะหมุนวนเป็นเกลียวขึ้นสู่ช่องระบายลมส่วนบนคล้ายรูปทรงกรวยคว่ำโดยมีความเร็วสูงสุดในบริเวณทางออก
- 2) ค่าความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย 21.1% และค่าดังกล่าวมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยตามค่าความเร็วลมที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง
- 3) ทิศทางในการป้อนลมในแนวระนาบที่เหมาะสมควรพุ่งเข้าหาบริเวณส่วนกลางของรัศมีห้องอบแห้ง โดยการป้อนลมในลักษณะนี้จะทำให้การกระจายตัวของลมในห้องอบมีความสม่ำเสมอมากกว่าการป้อนในแนวเส้นสัมผัส
- 4) การป้อนลมที่เหมาะสมควรเป็นรูปแบบลดหลั่นจากท่อด้านล่างไปยังท่อด้านบน จากโครงการนี้พบว่า อัตราการป้อนลมที่ทำให้การกระจายตัวของลมในห้องอบมีความสม่ำเสมอคือ ท่อที่หนึ่ง (บนสุด) 32.74% ท่อที่สอง (กลาง) 33.33% และท่อที่สาม (ล่างสุด) 33.91% โดยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความเร็วลมในห้องอบในกรณีนี้เป็น 7.905%

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการที่จะนำเทคนิค CFD เข้ามาช่วยในการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ผู้ที่สนใจควรจะมีพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในด้านงานเขียนแบบมาพอสมควร ประกอบกับความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของไหลซึ่งจะช่วยให้ เข้าใจพฤติกรรมของของไหลได้ดียิ่งขึ้นและสามารถวิเคราะห์ปัญหาได้ดียิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

นิรนาม. ( ). ไม่มีชื่อเรื่อง. URL:[http\ www.me.neu.ac.th/cfd\\_ch.pdf](http://www.me.neu.ac.th/cfd_ch.pdf) [สืบค้น: 6 มี.ค. 2548]

ปราโมทย์ และ วรสิทธิ์. ( ). ไม่มีชื่อเรื่อง. URL:[http\www.acat.or.th](http://www.acat.or.th) [สืบค้น: 2 มี.ค. 2548]

มนตรี พิรุณเกษตร. (2545). กลศาสตร์ของไหล. ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชชุดา ศรีประเทศ วิรุจน์ พิพัฒศรี สุรางค์ ตั้งมั่น. (2546). การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วิศิษฐ์ จาตุรमान , ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์. (2544). กลศาสตร์ของไหล. แผนกวิชาช่างยนต์, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ.

สมชาติ โสภณธฤทธิ. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมบัติ ขอทวีวัฒนา. (2529). กรรมวิธีการอบแห้ง. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. กรุงเทพฯ.

Ficarella, A., Perago, A., Starace, G. and Laforgia, D. (2002). Thermo-Fluid-Dynamic Investigation of A Dryer , Using Numerical and Experimental Approach.

URL:[http\www.elsevier.com/locate/jfoodeng](http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng) [Accessed: April 13, 2005]

Foster, A.M., Barrett, R., James, S.J. and Swain, M.J. (2004). The Use of CFD to Improve The Performance of a Chilled Multi-Deck Retail Display Cabinet.

URL:[http\www.elsevier.com/locate/ijrefrig](http://www.elsevier.com/locate/ijrefrig) [Accessed: April 13, 2005]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Mirade,P.-S.(2002). Preciction of The Air Velocity Field in Modern Mest Dryers Using Unsteady Computational Fluid Dynamic Models. URL:<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng> [Accessed: April 13, 2005]
- Nahor, H.B., Hoang, M.L. , Verboven, P., Baelmans, M. and Nicolai,B.M.(2004). CFD Model of The Airflow , Heat and Mass Transfer in Cool Stores. URL:<http://www.elsevier.com/locate/ijrefrig> [Accessed: March 28, 2005]
- Olsson ,E.E.M., Ahrne ,L.M., Tragardh,A.C. (2003). Heat Transfer From a Slot Air Jet Impinging On A Circlar Cylinder. URL:<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng> [Accessed: March 22, 2005]
- Scott,G. and Richarson,P. (1997). The Application of Computational Fluid Dynamic in The Food Industry. Trends in Food Science and Technology, pp.119-124. [Accessed: April 8, 2005]
- Straatsma ,J. , Van Houwelingen, G. , Steenbergen,A.E. and De Jong ,P.(1999). Spray Drying of Food Products :1. Simulation Model. URL:<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng> [Accessed: April 18, 2005]
- Xia ,A.B. and Sun , D.W. (2002). Application of Computational Fluid Dynamic in the Food Industry . URL:<http://www.elsevier.com/locate/compag> [Accessed: April 11, 2005]



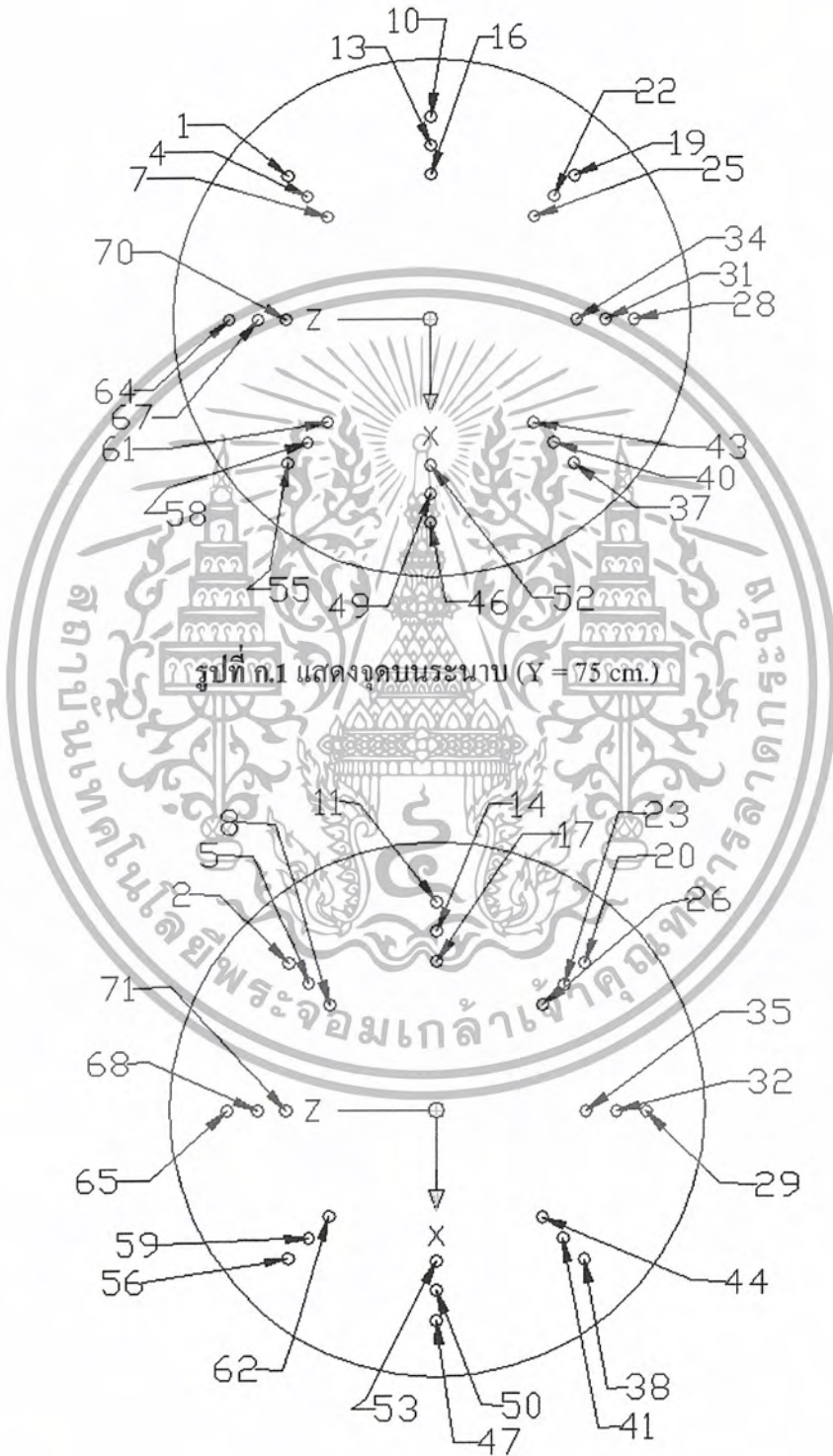


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

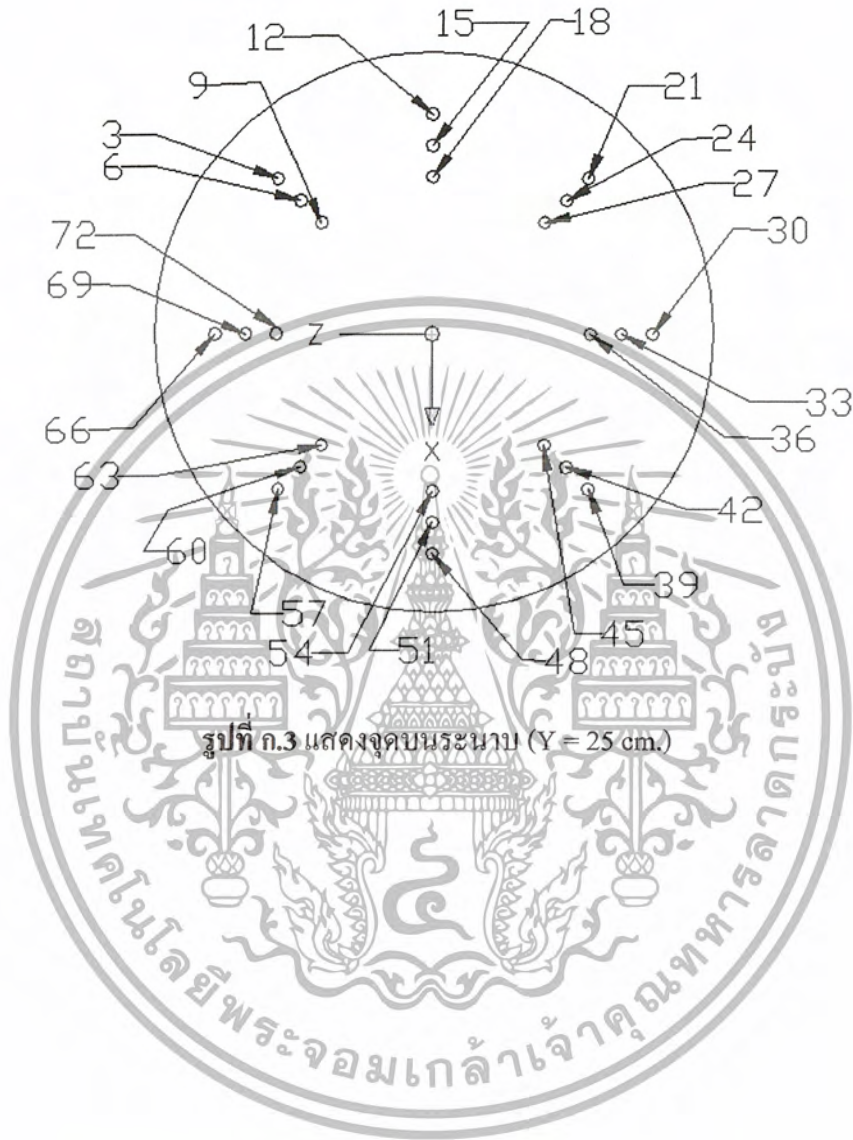
ภาคผนวก ก

ตำแหน่งจุดที่ใช้ทำการวัดความเร็วกระแสลม



รูปที่ ก.2 แสดงจุดบนระนาบ (Y = 50 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

แสดงพิกัดต่างๆ ที่ใช้ในการวัดกระความเร็วลม

ตารางที่ ข.1 แสดงพิกัดของจุดที่ระนาบ (Y= 75 cm.)

| จุดที่ | ตำแหน่งพิกัดบนห้องอบแห้ง |        |
|--------|--------------------------|--------|
|        | X                        | Z      |
| 1      | -34.44                   | -6.42  |
| 4      | -29.52                   | -5.51  |
| 7      | -24.60                   | -4.60  |
| 10     | -30.46                   | 17.19  |
| 13     | -26.11                   | 14.73  |
| 16     | -21.75                   | 12.28  |
| 19     | -12.28                   | 32.75  |
| 22     | -10.52                   | 28.07  |
| 25     | -8.77                    | 23.39  |
| 28     | 11.64                    | 32.98  |
| 31     | 9.98                     | 28.27  |
| 34     | 8.31                     | 23.55  |
| 37     | 30.12                    | 17.78  |
| 40     | 25.82                    | 15.24  |
| 43     | 21.51                    | 12.70  |
| 46     | 29.52                    | -18.76 |
| 49     | 25.30                    | -16.08 |
| 52     | 21.08                    | -13.39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |        |        |
|----|--------|--------|
| 55 | 13.42  | -32.30 |
| 58 | 11.50  | -27.68 |
| 61 | 9.58   | -23.06 |
| 64 | -10.48 | -33.37 |
| 67 | -8.98  | -28.60 |
| 70 | -7.48  | -23.83 |

ตารางที่ ข.2 แสดงพิกัดของจุดที่ระนาบ (Y= 50 cm.)

| จุดที่ | ตำแหน่งพิกัดบนห้องอบแห้ง |       |
|--------|--------------------------|-------|
|        | X                        | Z     |
| 2      | -34.44                   | -6.42 |
| 5      | -29.52                   | 5.51  |
| 8      | -24.60                   | -4.60 |
| 11     | -30.46                   | 17.19 |
| 14     | -26.11                   | 14.73 |
| 17     | -21.75                   | 12.28 |
| 20     | -12.28                   | 32.75 |
| 23     | -10.52                   | 28.07 |
| 26     | -8.77                    | 23.39 |
| 29     | 11.64                    | 32.98 |
| 32     | 9.98                     | 28.27 |
| 35     | 8.31                     | 23.55 |
| 38     | 30.12                    | 17.78 |
| 41     | 25.82                    | 15.24 |
| 44     | 21.51                    | 12.70 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |        |        |
|----|--------|--------|
| 47 | 29.52  | -18.76 |
| 50 | 25.30  | -16.08 |
| 53 | 21.08  | -13.39 |
| 56 | 13.42  | -32.30 |
| 59 | 11.50  | -27.68 |
| 62 | 9.58   | -23.06 |
| 65 | -10.48 | -33.37 |
| 68 | -8.98  | -28.60 |
| 71 | -7.48  | -23.83 |

ตารางที่ ข.3 แสดงพิกัดของจุดที่ระนาบ ( $Y=25$  cm.)

| จุดที่ | ตำแหน่งพิกัดบนห้องอบแห้ง |       |
|--------|--------------------------|-------|
|        | X                        | Z     |
| 3      | -34.44                   | -6.42 |
| 6      | -29.52                   | -5.51 |
| 9      | -24.60                   | -4.60 |
| 12     | -30.46                   | 17.19 |
| 15     | -26.11                   | 14.73 |
| 18     | -21.75                   | 12.28 |
| 21     | -12.28                   | 32.75 |
| 24     | -10.52                   | 28.07 |
| 27     | -8.77                    | 23.39 |
| 30     | 11.64                    | 32.98 |
| 33     | 9.98                     | 28.27 |
| 36     | 8.31                     | 23.55 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |        |        |
|----|--------|--------|
| 39 | 30.12  | 17.78  |
| 42 | 25.82  | 15.24  |
| 45 | 21.51  | 12.70  |
| 48 | 29.52  | -18.76 |
| 51 | 25.30  | -16.08 |
| 54 | 21.08  | -13.39 |
| 57 | 13.42  | -32.30 |
| 60 | 11.50  | -27.68 |
| 63 | 9.58   | -23.06 |
| 66 | -10.48 | -33.37 |
| 69 | -8.98  | -28.60 |
| 72 | -7.48  | -23.83 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ผลการบันทึกกระแสความเร็วลมเปรียบเทียบการคำนวณโดย CFD

ตารางที่ ค.1 ผลการบันทึกกระแสความเร็วลมเปรียบเทียบการคำนวณโดย CFD ในกรณีที่ 1

| ตำแหน่งที่ | ค่าความเร็ว<br>จากเครื่องอบ | ค่าความเร็วจาก<br>การคำนวณ | ผลต่างของค่าคลาด<br>เคลื่อน | (ผลต่างของค่า<br>คลาดเคลื่อน) <sup>2</sup> |
|------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| 1          | 0.22                        | 0.28                       | -0.06                       | 0.0036                                     |
| 2          | 0.22                        | 0.25                       | -0.03                       | 0.0009                                     |
| 3          | 0.24                        | 0.25                       | -0.01                       | 0.0001                                     |
| 4          | 0.3                         | 0.32                       | -0.02                       | 0.0004                                     |
| 5          | 0.3                         | 0.28                       | 0.02                        | 0.0004                                     |
| 6          | 0.31                        | 0.25                       | 0.06                        | 0.0036                                     |
| 7          | 0.28                        | 0.28                       | 0                           | 0  |
| 8          | 0.28                        | 0.28                       | 0                           | 0  |
| 9          | 0.47                        | 0.25                       | 0.22                        | 0.0484                                     |
| 10         | 0.24                        | 0.32                       | -0.08                       | 0.0064                                     |
| 11         | 0.2                         | 0.32                       | -0.12                       | 0.0144                                     |
| 12         | 0.18                        | 0.25                       | -0.07                       | 0.0049                                     |
| 13         | 0.3                         | 0.32                       | -0.02                       | 0.0004                                     |
| 14         | 0.42                        | 0.28                       | 0.14                        | 0.0196                                     |
| 15         | 0.34                        | 0.25                       | 0.09                        | 0.0081                                     |
| 16         | 0.27                        | 0.25                       | 0.02                        | 0.0004                                     |
| 17         | 0.36                        | 0.25                       | 0.11                        | 0.0121                                     |
| 18         | 0.41                        | 0.25                       | 0.16                        | 0.0256                                     |
| 19         | 0.31                        | 0.25                       | 0.06                        | 0.0036                                     |
| 20         | 0.25                        | 0.25                       | 0                           | 0  |
| 21         | 0.22                        | 0.25                       | -0.03                       | 0.0009                                     |
| 22         | 0.35                        | 0.25                       | 0.1                         | 0.01                                       |
| 23         | 0.41                        | 0.25                       | 0.16                        | 0.0256                                     |
| 24         | 0.26                        | 0.25                       | 0.01                        | 0.0001                                     |
| 25         | 0.3                         | 0.24                       | 0.06                        | 0.0036                                     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |      |      |       |        |
|----|------|------|-------|--------|
| 26 | 0.28 | 0.25 | 0.03  | 0.0009 |
| 27 | 0.18 | 0.25 | -0.07 | 0.0049 |
| 28 | 0.34 | 0.27 | 0.07  | 0.0049 |
| 29 | 0.29 | 0.28 | 0.01  | 1E-04  |
| 30 | 0.18 | 0.25 | -0.07 | 0.0049 |
| 31 | 0.38 | 0.28 | 0.1   | 0.01   |
| 32 | 0.4  | 0.28 | 0.12  | 0.0144 |
| 33 | 0.2  | 0.25 | -0.05 | 0.0025 |
| 34 | 0.33 | 0.27 | 0.06  | 0.0036 |
| 35 | 0.3  | 0.25 | 0.05  | 0.0025 |
| 36 | 0.19 | 0.25 | -0.06 | 0.0036 |
| 37 | 0.25 | 0.28 | -0.03 | 0.0009 |
| 38 | 0.4  | 0.26 | 0.14  | 0.0196 |
| 39 | 0.31 | 0.25 | 0.06  | 0.0036 |
| 40 | 0.32 | 0.25 | 0.07  | 0.0049 |
| 41 | 0.37 | 0.25 | 0.12  | 0.0144 |
| 42 | 0.25 | 0.25 | 0     | 0      |
| 43 | 0.33 | 0.25 | 0.08  | 0.0064 |
| 44 | 0.28 | 0.26 | 0.02  | 0.0004 |
| 45 | 0.18 | 0.25 | -0.07 | 0.0049 |
| 46 | 0.36 | 0.28 | 0.08  | 0.0064 |
| 47 | 0.36 | 0.28 | 0.08  | 0.0064 |
| 48 | 0.38 | 0.25 | 0.13  | 0.0169 |
| 49 | 0.31 | 0.3  | 0.01  | 0.0001 |
| 50 | 0.31 | 0.28 | 0.03  | 0.0009 |
| 51 | 0.26 | 0.25 | 0.01  | 0.0001 |
| 52 | 0.28 | 0.28 | 0     | 0      |
| 53 | 0.28 | 0.25 | 0.03  | 0.0009 |
| 54 | 0.25 | 0.25 | 0     | 0      |
| 55 | 0.3  | 0.28 | 0.02  | 0.0004 |
| 56 | 0.29 | 0.28 | 0.01  | 1E-04  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |      |      |       |        |
|----|------|------|-------|--------|
| 57 | 0.32 | 0.25 | 0.07  | 0.0049 |
| 58 | 0.27 | 0.28 | -0.01 | 0.0001 |
| 59 | 0.29 | 0.28 | 0.01  | 1E-04  |
| 60 | 0.21 | 0.25 | -0.04 | 0.0016 |
| 61 | 0.31 | 0.28 | 0.03  | 0.0009 |
| 62 | 0.22 | 0.25 | -0.03 | 0.0009 |
| 63 | 0.21 | 0.25 | -0.04 | 0.0016 |
| 64 | 0.36 | 0.3  | 0.06  | 0.0036 |
| 65 | 0.31 | 0.28 | 0.03  | 0.0009 |
| 66 | 0.27 | 0.25 | 0.02  | 0.0004 |
| 67 | 0.31 | 0.25 | 0.06  | 0.0036 |
| 68 | 0.27 | 0.28 | -0.01 | 0.0001 |
| 69 | 0.22 | 0.25 | -0.03 | 0.0009 |
| 70 | 0.26 | 0.28 | -0.02 | 0.0004 |
| 71 | 0.23 | 0.28 | -0.05 | 0.0025 |
| 72 | 0.18 | 0.25 | 0.07  | 0.0049 |

| ค่าความเร็วจากเครื่องอบ |              | ค่าความเร็วจากการคำนวณโดย CFD |          |
|-------------------------|--------------|-------------------------------|----------|
| Mean                    | 0.289166667  | Mean                          | 0.265139 |
| Standard Error          | 0.007733709  | Standard Error                | 0.002382 |
| Median                  | 0.29         | Median                        | 0.25     |
| Mode                    | 0.31         | Mode                          | 0.25     |
| Standard Deviation      | 0.065622694  | Standard Deviation            | 0.02021  |
| Sample Variance         | 0.004306338  | Sample Variance               | 0.000408 |
| Kurtosis                | -0.181840785 | Kurtosis                      | 0.793202 |
| Skewness                | 0.321857821  | Skewness                      | 1.169179 |
| Range                   | 0.29         | Range                         | 0.08     |
| Minimum                 | 0.18         | Minimum                       | 0.24     |
| Maximum                 | 0.47         | Maximum                       | 0.32     |
| Sum                     | 20.82        | Sum                           | 19.09    |
| Count                   | 72           | Count                         | 72       |
| Confidence Level(95.0%) | 0.015420585  | Confidence Level(95.0%)       | 0.004749 |

ERROR OF CFD

0.1835181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ผลการบันทึกกระแสความเร็วลมเปรียบเทียบการคำนวณ โดย CFD ในกรณีที่ 2

| ตำแหน่งที่ | ค่าความเร็ว<br>จากเครื่องอบ | ค่าความเร็วจาก<br>การคำนวณ | ผลต่างของค่าคลาด<br>เคลื่อน | (ผลต่างของค่าคลาด<br>เคลื่อน) <sup>2</sup> |
|------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| 1          | 0.26                        | 0.37                       | -0.11                       | 0.0121                                     |
| 2          | 0.41                        | 0.54                       | -0.13                       | 0.0169                                     |
| 3          | 0.18                        | 0.36                       | -0.18                       | 0.0324                                     |
| 4          | 0.3                         | 0.4                        | -0.1                        | 0.01                                       |
| 5          | 0.32                        | 0.5                        | -0.18                       | 0.0324                                     |
| 6          | 0.34                        | 0.36                       | -0.02                       | 0.0004                                     |
| 7          | 0.21                        | 0.4                        | -0.19                       | 0.0361                                     |
| 8          | 0.23                        | 0.45                       | -0.22                       | 0.0484                                     |
| 9          | 0.7                         | 0.38                       | 0.32                        | 0.1024                                     |
| 10         | 0.32                        | 0.4                        | -0.08                       | 0.0064                                     |
| 11         | 0.36                        | 0.59                       | -0.23                       | 0.0529                                     |
| 12         | 0.19                        | 0.38                       | -0.19                       | 0.0361                                     |
| 13         | 0.3                         | 0.4                        | -0.1                        | 0.01                                       |
| 14         | 0.37                        | 0.45                       | -0.08                       | 0.0064                                     |
| 15         | 0.26                        | 0.36                       | -0.1                        | 0.01                                       |
| 16         | 0.21                        | 0.37                       | -0.16                       | 0.0256                                     |
| 17         | 0.23                        | 0.38                       | -0.15                       | 0.0225                                     |
| 18         | 0.57                        | 0.36                       | 0.21                        | 0.0441                                     |
| 19         | 0.28                        | 0.32                       | -0.04                       | 0.0016                                     |
| 20         | 0.39                        | 0.36                       | 0.03                        | 0.0009                                     |
| 21         | 0.36                        | 0.36                       | 0                           | 0  |
| 22         | 0.28                        | 0.32                       | -0.04                       | 0.0016                                     |
| 23         | 0.36                        | 0.36                       | 0                           | 0  |
| 24         | 0.35                        | 0.36                       | -0.01                       | 0.0001                                     |
| 25         | 0.22                        | 0.32                       | -0.1                        | 0.01                                       |
| 26         | 0.36                        | 0.34                       | 0.02                        | 0.0004                                     |
| 27         | 0.53                        | 0.36                       | 0.17                        | 0.0289                                     |
| 28         | 0.34                        | 0.35                       | -0.01                       | 1E-04                                      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |      |      |       |        |
|----|------|------|-------|--------|
| 29 | 0.29 | 0.36 | -0.07 | 0.0049 |
| 30 | 0.3  | 0.38 | -0.08 | 0.0064 |
| 31 | 0.35 | 0.35 | 0     | 0      |
| 32 | 0.2  | 0.36 | -0.16 | 0.0256 |
| 33 | 0.27 | 0.36 | -0.09 | 0.0081 |
| 34 | 0.38 | 0.35 | 0.03  | 0.0009 |
| 35 | 0.28 | 0.34 | -0.06 | 0.0036 |
| 36 | 0.14 | 0.36 | -0.22 | 0.0484 |
| 37 | 0.28 | 0.37 | -0.09 | 0.0081 |
| 38 | 0.36 | 0.36 | 0     | 0      |
| 39 | 0.35 | 0.4  | -0.05 | 0.0025 |
| 40 | 0.36 | 0.37 | -0.01 | 0.0001 |
| 41 | 0.36 | 0.36 | 0     | 0      |
| 42 | 0.26 | 0.37 | -0.11 | 0.0121 |
| 43 | 0.29 | 0.35 | -0.06 | 0.0036 |
| 44 | 0.26 | 0.34 | -0.08 | 0.0064 |
| 45 | 0.2  | 0.35 | -0.15 | 0.0225 |
| 46 | 0.38 | 0.42 | -0.04 | 0.0016 |
| 47 | 0.46 | 0.4  | 0.06  | 0.0036 |
| 48 | 0.34 | 0.42 | -0.08 | 0.0064 |
| 49 | 0.32 | 0.42 | -0.1  | 0.01   |
| 50 | 0.32 | 0.36 | -0.04 | 0.0016 |
| 51 | 0.3  | 0.4  | -0.1  | 0.01   |
| 52 | 0.22 | 0.4  | -0.18 | 0.0324 |
| 53 | 0.27 | 0.32 | -0.05 | 0.0025 |
| 54 | 0.31 | 0.35 | -0.04 | 0.0016 |
| 55 | 0.34 | 0.4  | -0.06 | 0.0036 |
| 56 | 0.32 | 0.4  | -0.08 | 0.0064 |
| 57 | 0.26 | 0.42 | -0.16 | 0.0256 |
| 58 | 0.28 | 0.42 | -0.14 | 0.0196 |
| 59 | 0.28 | 0.38 | -0.1  | 0.01   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |      |      |       |        |
|----|------|------|-------|--------|
| 60 | 0.42 | 0.4  | 0.02  | 0.0004 |
| 61 | 0.3  | 0.42 | -0.12 | 0.0144 |
| 62 | 0.23 | 0.33 | -0.1  | 0.01   |
| 63 | 0.23 | 0.4  | -0.17 | 0.0289 |
| 64 | 0.29 | 0.37 | -0.08 | 0.0064 |
| 65 | 0.37 | 0.45 | -0.08 | 0.0064 |
| 66 | 0.29 | 0.42 | -0.13 | 0.0169 |
| 67 | 0.32 | 0.4  | -0.08 | 0.0064 |
| 68 | 0.3  | 0.45 | -0.15 | 0.0225 |
| 69 | 0.34 | 0.4  | -0.06 | 0.0036 |
| 70 | 0.33 | 0.4  | -0.07 | 0.0049 |
| 71 | 0.28 | 0.42 | -0.14 | 0.0196 |
| 72 | 0.25 | 0.4  | -0.15 | 0.0225 |

| ค่าความเร็วจากเครื่องอบ |             | ค่าความเร็วจากการคำนวณโดยใช้ CFD |          |
|-------------------------|-------------|----------------------------------|----------|
| Mean                    | 0.312638889 | Mean                             | 0.386111 |
| Standard Error          | 0.010253045 | Standard Error                   | 0.005494 |
| Median                  | 0.3         | Median                           | 0.375    |
| Mode                    | 0.36        | Mode                             | 0.36     |
| Standard Deviation      | 0.086999969 | Standard Deviation               | 0.04662  |
| Sample Variance         | 0.007568995 | Sample Variance                  | 0.002173 |
| Kurtosis                | 5.521422175 | Kurtosis                         | 5.476814 |
| Skewness                | 1.62000557  | Skewness                         | 1.826471 |
| Range                   | 0.56        | Range                            | 0.27     |
| Minimum                 | 0.14        | Minimum                          | 0.32     |
| Maximum                 | 0.7         | Maximum                          | 0.59     |
| Sum                     | 22.51       | Sum                              | 27.8     |
| Count                   | 72          | Count                            | 72       |
| Confidence Level(95.0%) | 0.020444    | Confidence Level(95.0%)          | 0.010955 |

ERROR OF CFD

0.355968532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ผลการบันทึกความเร็วจากการคำนวณโดย CFD

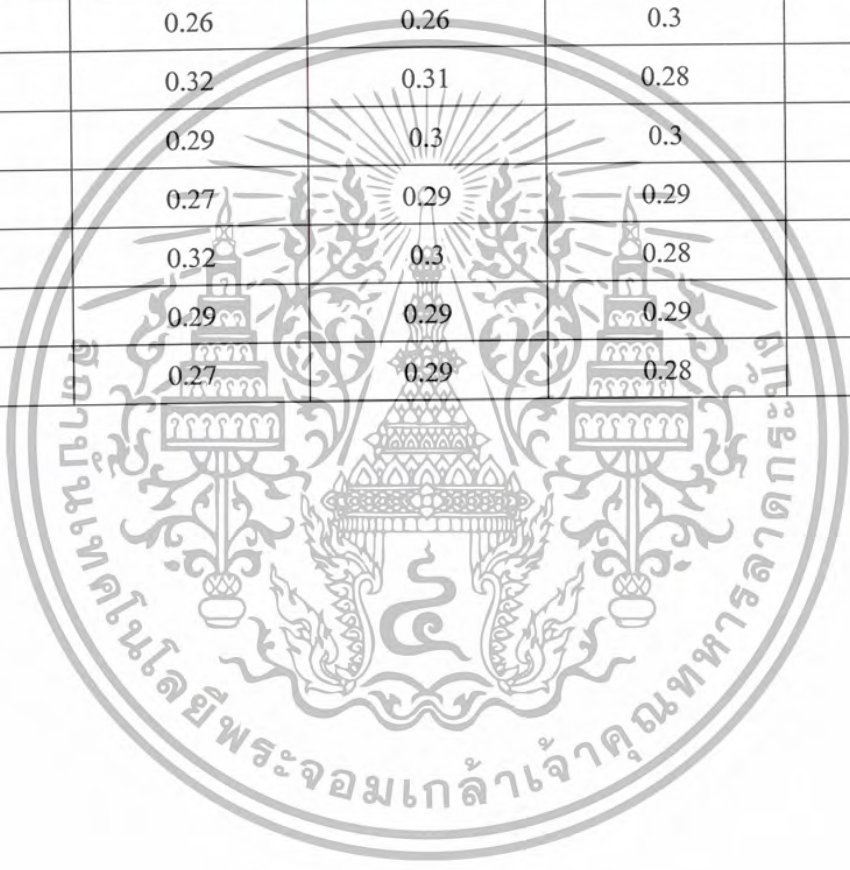
| ตำแหน่งที่ | ความเร็วกระแสลมที่ได้จากการคำนวณ ( เมตร/วินาที ) |             |             |             |
|------------|--|-------------|-------------|-------------|
|            | รูปแบบที่ 1                                      | รูปแบบที่ 2 | รูปแบบที่ 3 | รูปแบบที่ 4 |
| 1          | 0.3  | 0.3         | 0.3         | 0.31        |
| 2          | 0.29   | 0.3         | 0.31        | 0.32        |
| 3          | 0.25   | 0.26        | 0.25        | 0.29        |
| 4          | 0.31   | 0.3         | 0.31        | 0.32        |
| 5          | 0.3  | 0.31        | 0.32        | 0.33        |
| 6          | 0.26   | 0.26        | 0.27        | 0.29        |
| 7          | 0.3  | 0.3         | 0.3         | 0.32        |
| 8          | 0.3  | 0.31        | 0.31        | 0.32        |
| 9          | 0.27   | 0.26        | 0.27        | 0.29        |
| 10         | 0.32   | 0.32        | 0.32        | 0.34        |
| 11         | 0.34   | 0.34        | 0.36        | 0.38        |
| 12         | 0.27   | 0.26        | 0.27        | 0.29        |
| 13         | 0.32   | 0.29        | 0.29        | 0.31        |
| 14         | 0.3  | 0.31        | 0.31        | 0.32        |
| 15         | 0.28   | 0.26        | 0.27        | 0.28        |
| 16         | 0.29   | 0.28        | 0.29        | 0.31        |
| 17         | 0.28   | 0.28        | 0.29        | 0.29        |
| 18         | 0.27   | 0.26        | 0.27        | 0.28        |
| 19         | 0.25   | 0.23        | 0.24        | 0.22        |
| 20         | 0.24   | 0.24        | 0.24        | 0.25        |
| 21         | 0.26   | 0.26        | 0.23        | 0.29        |
| 22         | 0.25   | 0.23        | 0.24        | 0.25        |
| 23         | 0.25   | 0.25        | 0.25        | 0.27        |
| 24         | 0.26   | 0.26        | 0.24        | 0.24        |
| 25         | 0.25   | 0.23        | 0.24        | 0.24        |
| 26         | 0.25   | 0.25        | 0.25        | 0.26        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|
| 27 | 0.27 | 0.26 | 0.24 | 0.29 |
| 28 | 0.29 | 0.26 | 0.27 | 0.27 |
| 29 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.28 |
| 30 | 0.27 | 0.26 | 0.27 | 0.25 |
| 31 | 0.29 | 0.26 | 0.27 | 0.25 |
| 32 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.28 |
| 33 | 0.27 | 0.26 | 0.28 | 0.26 |
| 34 | 0.29 | 0.25 | 0.26 | 0.24 |
| 35 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.28 |
| 36 | 0.27 | 0.29 | 0.26 | 0.29 |
| 37 | 0.29 | 0.28 | 0.27 | 0.29 |
| 38 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.27 |
| 39 | 0.27 | 0.29 | 0.28 | 0.28 |
| 40 | 0.29 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| 41 | 0.28 | 0.27 | 0.27 | 0.29 |
| 42 | 0.27 | 0.29 | 0.28 | 0.29 |
| 43 | 0.29 | 0.27 | 0.27 | 0.28 |
| 44 | 0.27 | 0.27 | 0.3  | 0.29 |
| 45 | 0.27 | 0.29 | 0.27 | 0.31 |
| 46 | 0.32 | 0.29 | 0.33 | 0.3  |
| 47 | 0.29 | 0.28 | 0.3  | 0.29 |
| 48 | 0.27 | 0.26 | 0.29 | 0.32 |
| 49 | 0.32 | 0.3  | 0.28 | 0.3  |
| 50 | 0.29 | 0.28 | 0.29 | 0.29 |
| 51 | 0.27 | 0.29 | 0.28 | 0.3  |
| 52 | 0.29 | 0.29 | 0.28 | 0.29 |
| 53 | 0.27 | 0.27 | 0.3  | 0.29 |
| 54 | 0.27 | 0.29 | 0.29 | 0.32 |
| 55 | 0.32 | 0.3  | 0.27 | 0.31 |
| 56 | 0.29 | 0.3  | 0.31 | 0.29 |
| 57 | 0.26 | 0.26 | 0.3  | 0.32 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|
| 58 | 0.32 | 0.31 | 0.28 | 0.31 |
| 59 | 0.29 | 0.3  | 0.29 | 0.29 |
| 60 | 0.2  | 0.29 | 0.29 | 0.31 |
| 61 | 0.29 | 0.29 | 0.28 | 0.29 |
| 62 | 0.29 | 0.28 | 0.3  | 0.29 |
| 63 | 0.27 | 0.29 | 0.29 | 0.31 |
| 64 | 0.32 | 0.29 | 0.27 | 0.31 |
| 65 | 0.29 | 0.28 | 0.31 | 0.29 |
| 66 | 0.26 | 0.26 | 0.3  | 0.31 |
| 67 | 0.32 | 0.31 | 0.28 | 0.27 |
| 68 | 0.29 | 0.3  | 0.3  | 0.32 |
| 69 | 0.27 | 0.29 | 0.29 | 0.32 |
| 70 | 0.32 | 0.3  | 0.28 | 0.29 |
| 71 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.32 |
| 72 | 0.27 | 0.29 | 0.28 | 0.31 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้