

การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและเส้นทางเดินอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล  
ในเครื่องคัดแยกอนุภาคแบบไซโคลน

NUMERICAL SIMULATION ON AIR FLOW AND PARTICLE TRAJECTORIES  
OF PULVERIZED BIOMASS IN A CYCLONE SEPARATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-114

การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและเส้นทางเดินอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล  
ในเครื่องคัดแยกอนุภาคแบบไซโคลน

NUMERICAL SIMULATION ON AIR FLOW AND PARTICLE TRAJECTORIES  
OF PULVERIZED BIOMASS IN A CYCLONE SEPARATOR



สิริธิดา สุขทั่ว  
SIRITIDA SOOKTOUR

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL SIMULATION ON AIR FLOW AND PARTICLE TRAJECTORIES  
OF PULVERIZED BIOMASS IN A CYCLONE SEPARATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-EN-M-030-114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017


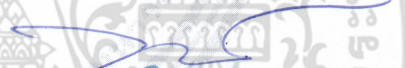



FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

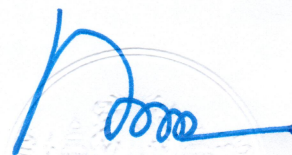
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและเส้นทางเดินอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล  
ในเครื่องคัดแยกอนุภาคแบบไซโคลน  
Thesis Title Numerical Simulation on Air Flow and Particle Trajectories of Pulverized  
Biomass in a Cyclone Separator  
นักศึกษา นางสาวสิริธิดา สุขทั่ว  
รหัสประจำตัว 58601120  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจียรนะโนวชิระ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-114

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมชาย	ศรีพัฒนะทิพัฒน์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
รศ.ดร.ชินรัชช์	เจียรพงษ์	
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	
ผศ.ดร.ณัฏวิภา	เจียรนะโนวชิระ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและเส้นทางเดินอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลในเครื่องคัดแยกอนุภาคแบบไซโคลน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสิริธิดา สุขทั่ว
รหัสประจำตัว	58601120
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสนามการไหลและเส้นทางเดินของชีวมวลผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.40 ไมครอน ที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที และ 6.76 ไมครอน ที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาทีที่เกิดขึ้นในเครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข วิเคราะห์อิทธิพลของแรง Saffman ที่กระทำต่อชีวมวลผงและเส้นทางเดินที่จุดปล่อยตำแหน่งต่างๆ ที่ทางเข้าไซโคลนเพื่อให้เข้าใจกลไกการคัดแยกชีวมวลผงของไซโคลน ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของไซโคลนเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเร็วที่ทางเข้าสูงขึ้นและมีขนาดตัดอนุภาคเล็กลง ผลที่ได้จากการจำลองสนามการไหลในไซโคลนพบว่าที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที อัตราส่วน  $U_{tan}/U_{in}$  มีการกระจายตัวเท่ากันตลอดทั้ง 3 ระบายในไซโคลน ที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาทีมีอัตราส่วน  $U_{tan}/U_{in}$  เพิ่มขึ้น และค่าสูงสุดของอัตราส่วน  $U_{axial}/U_{in}$  มากกว่าที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้อัตราส่วน  $U_{axial}/U_{in}$  ในระนาบที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งมีระยะห่างจากท่อทางออกด้านบนจากน้อยไปมาก จะมีความเร็วลดลงตามลำดับ เนื่องจากมวลอากาศลดลง โดยที่แกนกลางมีความเร็วลดลงเล็กน้อยตามลำดับเช่นกัน ที่บริเวณใกล้ผนังความเร็วมีค่าติดลบตลอดทั้ง 3 ระบาย พบว่าเมื่อความเร็วที่ทางเข้าเพิ่มขึ้น บริเวณใกล้ผนังมีค่าติดลบมากขึ้น จึงทำให้ชีวมวลผงขนาดใหญ่ที่ถูกเหวี่ยงให้ชิดผนังมีการเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของกระแสอากาศหมุนวนด้านนอก และไม่เกิดการไหลสวนทางขึ้นสู่ทางออกด้านบน แม้จะพบว่าอัตราส่วน  $U_{axial}/U_{in}$  ในระนาบที่ 3 มีค่ามากขึ้นในกรณีที่ความเร็วอากาศที่ทางเข้าเพิ่มขึ้นก็ตาม และเนื่องด้วยสัดส่วนของอนุภาคที่ถูกเหวี่ยงชิดผนังมีมากขึ้นที่ความเร็วทางเข้าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพไซโคลนดีขึ้น

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแรง Saffman ที่กระทำต่ออนุภาค พบว่าไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนต่อเส้นทางเดินชีวมวลผง ในขณะที่จุดปล่อยชีวมวลผงที่ตำแหน่งทางเข้าที่ต่างกัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพไซโคลน เนื่องจากรูปแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของชีวมวลผงที่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าจุดปล่อยบริเวณทางเข้าที่ต่ำและจุดปล่อยที่มีระยะตามแนวรัศมีไกลจุดกึ่งกลางไซโคลน มีเส้นทางเดินของอนุภาคเคลื่อนที่ในบริเวณกระแสอากาศหมุนวนด้านนอก ทำให้ชีวมวลผงตกลงสู่ทางออกด้านล่าง ส่งผลให้ไซโคลนมีประสิทธิภาพดี สำหรับจุดปล่อยที่อยู่สูงสุดและจุดปล่อยที่มีระยะตามแนวรัศมีใกล้จุดกึ่งกลาง มีเส้นทางเดินชีวมวลผงเคลื่อนที่เข้าสู่กระแสอากาศหมุนวนด้านใน และหลุดออกไปยังทางด้านบนไซโคลน ส่งผลให้ประสิทธิภาพไซโคลนลดลง ดังนั้นรัศมีการหมุนวนของเส้นทางเดินชีวมวลผงจะสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพไซโคลนอย่างยิ่ง

<b>Thesis Title</b>	Numerical Simulation on Air Flow and Particle Trajectories of Pulverized Biomass in A Cyclone Separator
<b>Student</b>	Miss. Siritida Sooktour
<b>Student ID.</b>	58601120
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Nuthvipa Jayranaiwachira
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk

### ABSTRACT

The objective of this research is to study flow field characteristics and particle trajectories of particle with 7.40  $\mu\text{m}$  (8 m/s) and 6.76  $\mu\text{m}$  (10 m/s) diameter in cyclone separator by numerical modelling. The effect of the Saffman force and particle injection position at inlet of the cyclone were analyzed to determine the mechanism of separation with pulverized biomass. It was found from experiment that the efficiency of cyclone was increased with decreasing in cut size diameter when inlet air velocity was increased. Flow field characteristics from simulation indicated normalized tangential velocity distribution  $U_{\text{tan}}/U_{\text{in}}$  at 8 and 10 m/s was almost the same in 3 monitoring planes. At inlet air velocity of 10 m/s, normalized tangential velocity  $U_{\text{tan}}/U_{\text{in}}$  and maximum of normalized axial velocity  $U_{\text{axial}}/U_{\text{in}}$  were higher than the case with inlet velocity of 8 m/s. The value of  $U_{\text{axial}}/U_{\text{in}}$  at 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> planes decreased with increasing distance from vortex finder as less amount of air was present. At the center of each plane also had slightly decreased velocity. The axial velocity near the wall was observed with negative value at 3 monitoring planes. An increase in inlet velocity resulted in deeper negative axial velocity near wall thus larger particle was casted close to wall and moved downward following the direction of outer vortex, despite at at 3<sup>rd</sup> plane the  $U_{\text{axial}}/U_{\text{in}}$  was increased with increasing inlet velocity. As greater centrifugal effect brought particles nearer to wall with greater downdraft effect for the case of higher inlet velocity, these had resulted in higher cyclone efficiency.

Apart from above finding, effect of Saffman force and Particle injection location on particle trajectories were investigated. The effect of the force was not clearly observed, while the difference in particle injection position had a significant effect on cyclone efficiency, since particles from different injection locations had experienced different flow field characteristics. Injection of particle with lower in position and greater in radial distance from the center of cyclone (near wall), would

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resulted in particles being forced into outer vortex and crashed to wall and travelled downward to the bottom of cyclone, resulted in high efficiency. Injection of particle with higher location and with radial distance close to the center of cyclone, would resulted in particle being entrained by updraft of the inner vortex and left the top exit of the cyclone, which drastically decrease the efficiency. It can be clearly observed that the radius of particle trajectories was strongly related to the efficiency of cyclone.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ความกรุณา ความช่วยเหลือและแนวทางแก้ไขปัญหาลดจนการถ่ายทอดความรู้ที่ดีจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จรรุวัตร เจริญสุข และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิภา เจริญระโนวชิระ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. นักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการ นักศึกษาปริญญาตรี โทและเอกในห้องทดลองการเผาไหม้ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล นายนิวัฒน์ สุขสาม และนายเอกราช บำรุงไทยชัย ชาญ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ นายชั้น และ นางจำเนียร สุขทั่ว (บิดาและมารดา) และครอบครัวสุขทั่ว ทุกคนเป็นอย่างยิ่งที่เฝ้าคอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้ทุนทรัพย์ในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนประสบความสำเร็จ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการฟันฝ่าปัญหาและอุปสรรคต่างๆเสมอมา ขอขอบคุณนายสุรัชย์ สิริพิพัฒน์ และผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่านที่ได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขอให้อำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการอำนวยพรความสุขสวัสดิ์จงมีแก่ทุกท่าน

สิริธิดา สุขทั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
3.1 หลักการออกแบบไซโคลน.....	14
3.1.1 ชนิดของไซโคลน.....	14
3.1.2 โครงสร้างสัดส่วนของไซโคลน.....	16
3.1.3 รูปแบบสนามการไหลของไซโคลน.....	18
3.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลนและกลไกการดักจับอนุภาคของไซโคลน.....	19
3.2 ประสิทธิภาพการคัดแยกของไซโคลน.....	21
3.3 แบบจำลองการไหลเชิงคณิตศาสตร์และวิธีการสร้างแบบจำลองการไหล.....	23
3.3.1 สมการอนุรักษ์มวล.....	23
3.3.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหลในทอมขึ้นส่วนย่อยของไหล.....	24
3.3.3 สมการพลังงานโมเมนตัมแบบ 3 มิติ.....	26
3.3.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ.....	28
3.3.5 แบบจำลองความเครียดเรย์โนลด์ส.....	30
3.3.6 การประเมินแบบจำลอง SIMPLEC.....	32
3.4 Discrete Phase Modeling.....	35
3.5 รูปแบบการจำลองอนุภาค.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 Lagrangian Trajectories Approach.....	38
3.5.3 ระเบียบวิธีแบบ Stochastic Approach.....	38
บทที่ 4 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง.....	40
4.1 อุปกรณ์การทดลองของระบบทั้งหมด .....	40
4.1.1 ถังเก็บชีวมวลอัดแท่ง .....	40
4.1.2 เครื่องบด .....	41
4.1.3 เครื่องดูดอากาศ.....	42
4.1.4 ไชโคลน.....	43
4.1.5 ถังกรองอากาศ.....	43
4.1.6 ถังเก็บชีวมวลผงที่ถูกไชโคลนดักจับ .....	44
4.1.7 ชีวมวลอัดแท่ง.....	45
4.2 การทดลองหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคไชโคลน.....	45
4.2.1 การคำนวณจำนวนการหมุนประสิทธิภาพ .....	47
4.2.2 การคำนวณหาขนาดตัดของอนุภาคเชื้อเพลิง .....	48
4.2.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของไชโคลน.....	48
4.3 รายละเอียดอุปกรณ์ชุดทดลองหาประสิทธิภาพไชโคลน .....	49
4.3.1 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค.....	49
4.3.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก .....	50
4.3.3 เครื่องวัดความเร็วของการไหล .....	50
4.3.4 ชีวมวลผง.....	51
4.4 ขั้นตอนการทดลองหาประสิทธิภาพของไชโคลน.....	52
บทที่ 5 การจำลองเชิงตัวเลขและการตรวจสอบความแม่นยำ.....	53
5.1 การสร้างแบบจำลองไชโคลน .....	53
5.2 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Solid Work 2014 .....	54
5.3 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาสนามการไหลในไชโคลน.....	56
5.4 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคในไชโคลน.....	59
5.5 ผลการตรวจสอบความแม่นยำของการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลใน ไชโคลน .....	61
5.5.1 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสที่ระนาบที่ 1 .....	61
5.5.2 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทาง ตามแนวแกนที่ระนาบที่ 1 .....	63
5.5.3 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็ว ในทิศทางตามแนวแกนที่ระนาบที่ 2.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5.4 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกนที่ระนาบที่ 3.....	65
5.6 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องและสนามการไหลภายในไซโคลน.....	67
5.7 ผลการตรวจสอบความแม่นยำของการจำลองเชิงตัวเลขของการปล่อยอนุภาคเข้าสู่ไซโคลน .....	67
บทที่ 6 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....	70
6.1 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพไซโคลน .....	70
6.2 วิจารณ์ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที. 71	
6.3 การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลน.....	72
6.3.1 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	72
6.3.1.1 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกนที่พิจารณาตามเส้นระนาบที่ 1.....	74
6.3.1.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามในทิศทางแนวแกนที่พิจารณาตามเส้นระนาบที่ 2.....	75
6.3.1.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามในทิศทางแนวแกนที่พิจารณาตามเส้นระนาบที่ 3.....	76
6.3.2 วิเคราะห์ผลการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	77
6.3.2.1 วิจารณ์ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 ต่อวินาที.....	77
6.3.2.2 วิจารณ์ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วตามแนวแกนในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 ต่อวินาที.....	78
6.4 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอน ที่ความเร็วทางเข้าเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที .....	81
6.5 วิจารณ์ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอน ที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที .....	86
6.5.1 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman และชีวมวลผงที่ไม่พิจารณาแรง Saffman.....	86
6.5.2 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่ถูกปล่อยตามตำแหน่งที่กำหนดบริเวณทางเข้าไซโคลน .....	86
6.6 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอน ที่ความเร็วทางเข้าไซโคลนเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที .....	91
6.7 วิจารณ์ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอน ที่ความเร็ว	

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 10 เมตรต่อวินาที การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขในโปรแกรมใด ๆ 96 หน้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.7.1 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman และชีวมวลผงที่ไม่พิจารณาแรง Saffman.....	96
6.7.2 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่ถูกปล่อยตามตำแหน่งที่กำหนดบริเวณทางเข้าไซโคลน.....	96
6.8 ผลการหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศา ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	98
6.8.1 วิจัยผลการหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศา ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	99
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	101
7.1 สรุปผลการทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลน.....	101
7.2 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงตัวเลขของสนามการไหลในไซโคลนกับการทดลองจากบทความ .....	101
7.3 สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลข.....	101
7.3.1 สรุปผลจากการจำลองการไหลในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	101
7.3.2 สรุปผลจากการศึกษาเส้นทางเดินชีวมวลผงในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	102
7.3.2.1 สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลข เปรียบเทียบการเลือกแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Models) พิจารณาแรง Saffman และไม่พิจารณาแรง Saffman ที่กระทำต่อชีวมวลผง .....	102
7.3.2.2 สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่ถูกปล่อยตามตำแหน่งที่กำหนดบริเวณทางเข้าไซโคลน.....	102
7.3.2.3 สรุปผลการหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศาด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข .....	103
7.4 ข้อเสนอแนะ.....	104
เอกสารอ้างอิง .....	105
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก แบบสังผลิต.....	108
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	110
ประวัติผู้เขียน.....	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

### Roman symbols

$A_p$	พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ, ( $\mu m$ )
$B_c$	เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น, ( $m$ )
$C_D$	สัมประสิทธิ์ของแรงต้านทาน
$d$	ขนาดอนุภาค, ( $\mu m$ )
$d_{10}$	ขนาดของอนุภาค, ( $m$ )
$d_{pj}$	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, ( $m$ )
$d_{pc}$	ขนาดตัดอนุภาค, ( $\mu m$ )
$D_C$	เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก, ( $m$ )
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน, ( $m$ )
$\bar{F}_D$	แรงดูดลาก, ( $N$ )
$g$	ความเร่งโน้มถ่วง, ( $m/s^2$ )
$N_e$	จำนวนรอบการหมุน, (รอบ)
$N_H$	ความเร็วทางเข้าสูงสุด, ( $m/s$ )
$P_{10}$	ความหนาแน่นของอนุภาค, ( $kg/m^3$ )
$R$	รัศมีตัวเรือน, ( $m$ )
$V_1$	ความเร็วทางเข้าไซโคลน, ( $m/s$ )

### Greek symbols

$\omega$	ความเร็วเชิงมุม, ( $rad/s$ )
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาค, ( $kg/m^3$ )
$\rho_g$	ความหนาแน่นของอากาศ, ( $kg/m^3$ )
$\mu_g$	ความหนืดของอากาศ, ( $Pa.s$ )
$\eta_j$	ประสิทธิภาพในแต่ละช่วง, (%)
$\eta$	ประสิทธิภาพในการคัดแยก, (%)
$u_F$	ความเร็วของไหล, ( $m/s$ )
$u_p$	ความเร็วอนุภาค, ( $m/s$ )

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รายละเอียดรูปแบบการคำนวณที่ใช้ประมวลผลในการจำลองไฮโคลน.....	10
3.1 ขนาดและสัดส่วนของไฮโคลนแบบ High Efficiency .....	16
3.2 ขนาดและสัดส่วนของไฮโคลนแบบ General Purpose .....	17
3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคัดแยกอนุภาค .....	22
3.4 พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพไฮโคลน .....	22
3.5 ข้อดีและข้อด้อยของไฮโคลน.....	23
3.6 สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน .....	26
3.7 การประเมินแบบจำลอง RSM (Reynolds Stress Model) .....	32
4.1 ขนาดของไฮโคลนที่ออกแบบ.....	47
4.2 แสดงสัดส่วนของขนาดเชื้อเพลิงในช่วงต่างๆ .....	48
4.3 แสดงอัตราส่วนขนาดตัดและประสิทธิภาพในแต่ละช่วง .....	49
5.1 รูปแบบการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการจำลองเชิงตัวเลขของการไหล .....	56
5.2 เงื่อนไขขอบเขตพื้นที่ของไฮโคลน .....	56
5.3 ตำแหน่งที่แบ่งระนาบของไฮโคลน.....	59
5.4 เงื่อนไขในการดำเนินการของอนุภาค.....	59
5.5 เงื่อนไขขอบเขตที่พื้นผิวของไฮโคลน.....	60
6.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพไฮโคลนที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที.....	70
6.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพไฮโคลนที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที.....	71
6.3 ประสิทธิภาพไฮโคลนของชีวมวลผงขนาด 7.40 และ 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	71
6.4 ตำแหน่งที่แบ่งระนาบของไฮโคลน .....	73
6.5 ประสิทธิภาพไฮโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศา ที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที .....	98

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	1
1.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ของชีวมวลผงที่ผ่านตะแกรง 1.5, 1 และ 0.5 มิลลิเมตร.....	2
1.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของไซโคลน .....	2
1.4 แผนผังการทดลองที่ 2.....	3
1.5 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	6
2.1 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกนสำหรับการ แก้ไซรูปแบบความดันที่ระนาบ 1,2 และ 3 .....	12
3.1 ไซโคลนแบบทางเข้าตามแนวเส้นสัมผัส .....	15
3.2 ไซโคลนแบบทางเข้าตามแนวแกน .....	15
3.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของไซโคลน .....	17
3.4 ส่วนประกอบของความเร็วในความเร็วระดับต่างๆ ของไซโคลนรูปแบบทั่วไป.....	18
3.5 ทิศทางของแรงที่กระทำต่ออนุภาค.....	20
3.6 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล .....	24
3.7 องค์ประกอบความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล.....	27
3.8 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x.....	27
3.9 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLEC.....	34
4.1 แผนภาพอุปกรณ์ชุดทดลองทั้งหมด.....	40
4.2 ถังเก็บชีวมวลผงอัดแท่ง.....	41
4.3 เครื่องบด.....	41
4.4 เครื่องดูดอากาศ (Vacuum Blower).....	42
4.5 ไซโคลน.....	43
4.6 ถังกรองอากาศ.....	44
4.7 ถังเก็บชีวมวลผง.....	44
4.8 ชีวมวลอัดแท่ง.....	45
4.9 แผนภาพแสดงอุปกรณ์การทดลองไซโคลน.....	45
4.10 แผนภาพการทดลองเพื่อเก็บตัวอย่างของชีวมวลผงที่ไซโคลนดักจับได้.....	46
4.11 ส่วนประกอบของไซโคลน .....	47
4.12 เครื่องคัดขนาดอนุภาค.....	50
4.13 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	50
4.14 เครื่องวัดความเร็วลม (Hot Wire).....	51
4.15 ชีวมวลผง.....	51
5.1 รูปวาดตัวแทนไซโคลนที่ใช้ในการจำลองเชิงเรขาคณิต.....	54
5.2 รูปวาดตัวแทนไซโคลนปรับเปลี่ยนมุมทางเข้าที่ใช้ในการจำลองเชิงเรขาคณิต ก) มุมทางเข้าไซโคลน 3 องศา ข) มุมทางเข้าไซโคลน 5 องศา (ค) จุดเปลี่ยนมุม .....	54
5.3 ตำแหน่งจุดเริ่มต้นในวาดตัวแทนไซโคลนเชิงเรขาคณิต.....	55

เอกสาร 5.3 ตำแหน่งจุดเริ่มต้นในวาดตัวแทนไซโคลนเชิงเรขาคณิต..... 55

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.4	เมชโครงสร้าง Hexahedral ของไซโคลน.....	55
5.5	รูปไซโคลนที่แสดงการกำหนดเงื่อนไข.....	57
5.6	ไซโคลนที่แบ่ง 3 ระบาย.....	58
5.7	แสดงลักษณะเมื่ออนุภาควิ่งมากระทบพื้นที่ผิวไซโคลน.....	60
5.8	แสดงเงื่อนไขขอบเขตแบบ Trap ของการจำลองการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	60
5.9	ตำแหน่งระบายที่ 1.....	61
5.10	ค่าเฉลี่ยของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสที่ระบายที่ 1 ( $y = -217.5 \text{ mm.}$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	62
5.11	ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสที่ระบายที่ 1 ( $y = -217.5$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	63
5.12	ความเร็วตามแนวแกนที่ระบายที่ 1 ( $y = -217.5$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	63
5.13	ตำแหน่งระบายที่ 2.....	64
5.13	ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสที่ระบายที่ 2 ( $y = -362.5$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	64
5.14	ความเร็วตามแนวแกนที่ระบายที่ 2 ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	64
5.15	ความเร็วตามแนวแกนที่ระบายที่ 2 ( $y = -362.5 \text{ mm.}$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	65
5.16	ตำแหน่งระบายที่ 3.....	65
5.17	ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสที่ระบายที่ 3 ( $y = -425.5 \text{ mm.}$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	66
5.18	ความเร็วตามแนวแกนที่ระบายที่ 3 ( $y = -425.5 \text{ mm.}$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ.....	66
5.19	ไซโคลนที่กำหนดปรากฏการณ์ของพื้นที่ผิว.....	67
5.20	การตรวจสอบความแม่นยำของประสิทธิภาพไซโคลน.....	68
5.21	ลักษณะของชีวมวลที่หลุดลงด้านบน (Escape) และ สะสมที่ทางออกด้านล่าง (Trap).....	69
6.1	ความดันสถิตภายในไซโคลน ที่ ระบาย $z=0$ .....	72
6.2	ไซโคลนระบายที่ 1,2 และ 3.....	73
6.3	ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสระบายที่ 1 ที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	74
6.4	ความเร็วในทิศทางตามแนวแกนระบายที่ 1 ที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	74
6.5	ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสระบายที่ 2 ที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	75
6.6	ความเร็วในทิศทางตามแนวแกนระบายที่ 2 ที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	75
6.7	ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสระบายที่ 3 ที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	76
6.8	ความเร็วในทิศทางตามแนวแกนระบายที่ 3 ที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที.....	76
6.9	แสดง force vortex และ free vortex ของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส.....	77
6.10	เวกเตอร์ความเร็วในไซโคลนที่ตำแหน่งระบายที่ 1.....	78
6.11	เวกเตอร์ความเร็วในไซโคลนที่ตำแหน่งระบายที่ 2.....	79
6.12	เวกเตอร์ความเร็วในไซโคลนที่ตำแหน่งระบายที่ 3.....	79
6.13	ความเร็วในไซโคลน.....	80
6.14	ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านบนในโปรแกรมโอเพ่นซอร์ส 81ราคา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านซ้าย.....	82
6.16 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลาง.....	83
6.17 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านขวา.....	84
6.18 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านล่าง.....	85
6.19 ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผงที่จุดต่างๆของทางเข้า.....	86
6.20 ตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินหลุดออกไปด้านบน.....	87
6.21 แสดงมุมการตกของชีวมวลผง.....	87
6.22 เส้นทางเดินชีวมวลผงรัศมีการหมุนวนแคบตำแหน่งปล่อยที่ 1 และตำแหน่งปล่อยที่ 4.....	88
6.23 ตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินตกลงด้านล่าง.....	88
6.24 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้างจุดปล่อยที่ 2 และจุดปล่อยที่ 3.....	89
6.25 มุมการตกของชีวมวลผง.....	89
6.26 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้าง จุดปล่อยที่.....	90
6.27 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านบน.....	91
6.28 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านซ้าย.....	92
6.29 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลาง.....	93
6.30 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านขวา.....	94
6.31 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านล่าง.....	95
6.32 ตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินหลุดขึ้นด้านบน.....	96
6.33 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้างจุดปล่อยที่ 5 จุดปล่อยที่ 8.....	97
6.34 ตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินตกลงด้านล่าง.....	97
6.35 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้างจุดปล่อยที่ 6 7 และ.....	98
6.36 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของทางเข้าไซโคลนมุม 5 องศา 3 องศา และไม่ปรับมุม ที่ระนาบ 1.....	99
6.37 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของทางเข้าไซโคลนมุม 5 องศา 3 องศา และไม่ปรับมุม ที่ระนาบ 2.....	99
6.38 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของทางเข้าไซโคลนมุม 5 องศา 3 องศา	

เอกสารนี้เป็นและไม่ปรับมุม ที่ระนาบ 3: ไม่แนะนำให้ลดความเร็วลมที่ปล่อยชีวมวลในถังไซโคลนในอัตรา 100 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

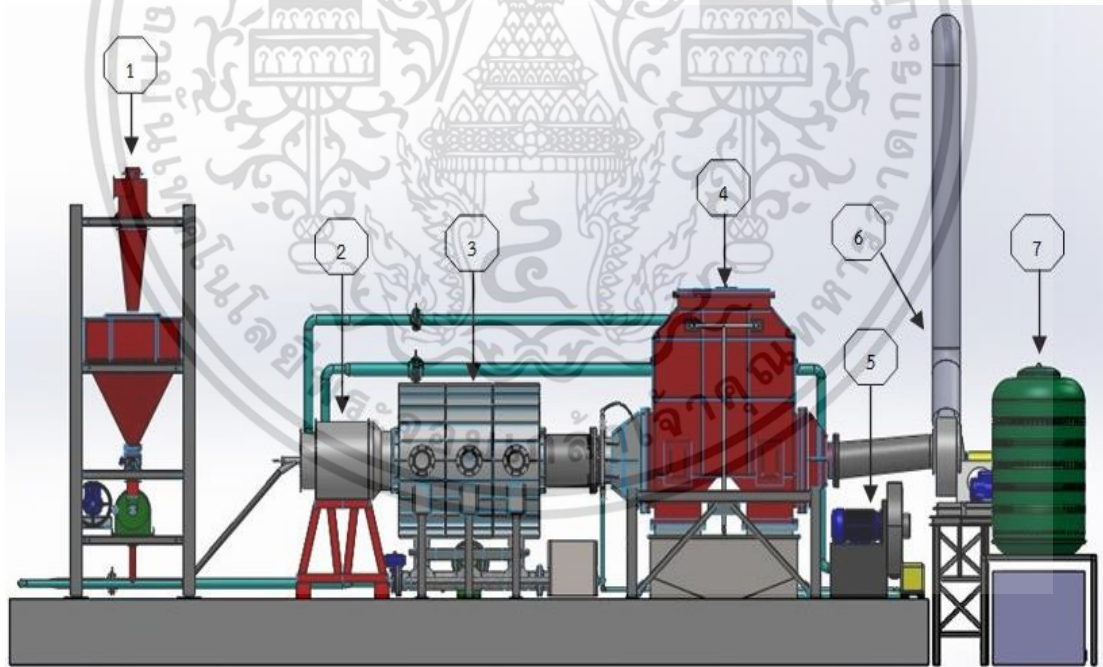
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการคัดแยกอนุภาคและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากอากาศของไซโคลนจะอาศัยหลักของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อากาศและอนุภาคของแข็งที่ไหลเข้าสู่ไซโคลนจะถูกทำให้เกิดการหมุนวน โดยการหมุนวนของไซโคลนจะมี 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการหมุนวนของอากาศที่มีทิศทางหมุนวนลงด้านล่าง (ชั้นนอก) และการหมุนวนที่มีทิศทางหมุนวนขึ้นด้านบน (ชั้นใน) การหมุนวนของอากาศจะทำให้อนุภาคของแข็งอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่มุ่งหน้าสู่ผนังของไซโคลน เมื่ออนุภาคของแข็งเคลื่อนที่จนถึงผนังของไซโคลนก็จะตกลงสู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยการพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรมของ ชินภัทร [18] ทำการทดลองนำไม้อัดแท่ง (Wood pellet) มาบดให้เป็นผงละเอียดและนำมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สร้อนให้แก่หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง เพื่อนำไปใช้ในหม้อไอน้ำ (Boiler) ดังแผนผังการทดลองรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนผังชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

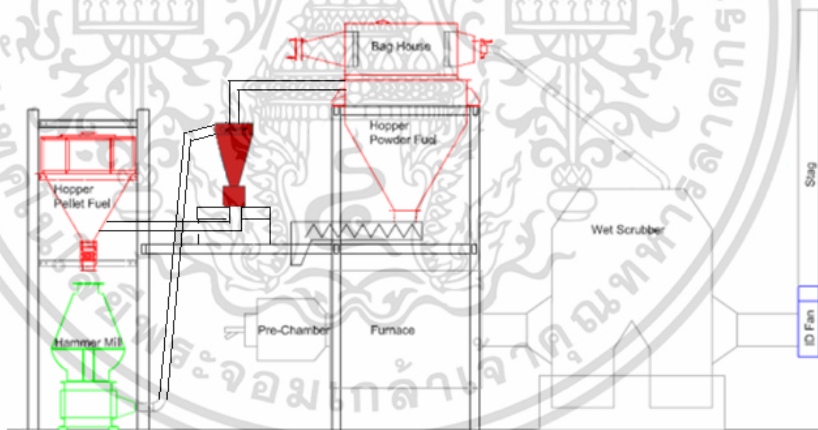
งานวิจัยดังกล่าวนำชีวมวลอัดแท่งมาบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิเมตร ทั้งนี้พบว่าชีวมวลที่ผ่านเครื่องบดที่ใช้ตะแกรงขนาด 1 และ 1.5 มิลลิเมตร จะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ขนาด 0.5 มิลลิเมตรเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ของชีวมวลผงที่ผ่านตะแกรง 1.5, 1 และ 0.5 มิลลิเมตร

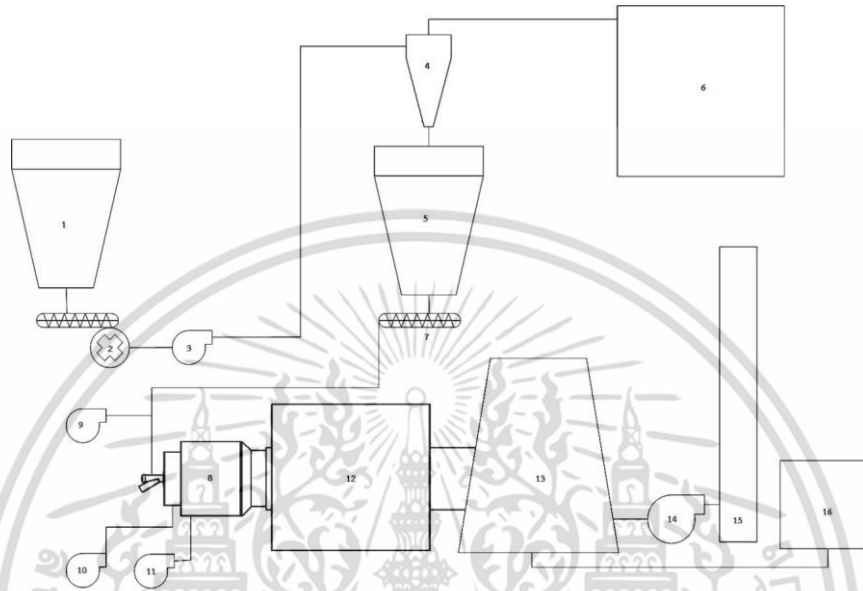
เมื่อใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรในการบดพบว่าเครื่องบดมีอัตราการผลิตไม่เพียงพอต่อการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนตั้งแต่ 200 KW. อีกทั้งชีวมวลผงที่ออกจากเครื่องบดจะมีขนาดที่ปะปนกัน จึงต้องการไซโคลนเพื่อนำมาคัดแยกชีวมวลผงที่ผ่านเครื่องบดที่ใช้ตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร ดังนั้นวัตถุประสงค์เริ่มต้นของงานวิจัยในปี 2015 ทำการออกแบบไซโคลนเพื่อคัดจับอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 0.5 มิลลิเมตรตกลงสู่ทางออกด้านล่าง อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตรหลุดออกสู่ทางออกด้านบนและติดตั้งไซโคลนกับอุปกรณ์การทดลองของ ชินภัทร [18] ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แผนผังการทดลองที่ 1

จากแผนผังการทดลองที่ 1 พบว่ามีข้อจำกัดในการติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ เนื่องจากต้องมีการปรับปรุงระบบการลำเลียงและเพิ่มระบบการขนส่งเชื้อเพลิงทำให้เกิดผลกระทบต่องานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในปี 2016 จึงได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างไซโคลนตามมาตรฐานของ Stairmand ภายใต้เงื่อนไขกำหนดขนาดตัดอนุภาคเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จากสมการหาขนาดตัดของอนุภาคและสมการที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยที่ทำให้ขนาดตัดอนุภาคเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร คือ ความเร็วทางเข้า และรูปร่างของไซโคลน จากผลการคำนวณพบว่าความเร็วทางเข้าไซโคลนมีค่าต่ำมากและรูปร่างของไซโคลนที่กำหนดจากเงื่อนไขการออกแบบมีขนาดไม่เหมาะสมต่อการผลิตและติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่น ประกอบกับความจำเป็นในการปรับปรุงกระบวนการบดเชื้อเพลิงเพื่อให้ประหยัดพลังงานมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งขึ้นจากผลการทดลองของงานวิจัย พีรพัฒน์ [16] โดยทำการบดเพียงครั้งเดียว ด้วยเครื่องบดชนิด Hammer mill และปรับเปลี่ยนหน้าที่ของไซโคลน จากการเป็นเครื่องคัดแยกอนุภาคที่ขนาดตัด 0.5 มิลลิเมตรมาเป็นเครื่องคัดแยกอนุภาคทั้งหมดที่ได้จากการบดเพียงครั้งเดียว โดยติดตั้งอยู่เหนือไซโลเก็บผงเชื้อเพลิง และทำการติดตั้ง Bag house เพื่อดักผงเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่ไซโคลนไม่สามารถดักได้อีกชั้นหนึ่ง ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แผนผังการทดลองที่ 2

อย่างไรก็ดี เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงกลไกการแยกอนุภาคของไซโคลน ที่ขนาดตัดอนุภาค 0.5 mm ตามที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้ จึงได้นำวิธีการจำลองเชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษากลไกของกระบวนการคัดแยกที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนตามมาตรฐานของ Stairmand เพื่อให้เกิดความเข้าใจและนำไปสู่การปรับเปลี่ยนรูปร่างไซโคลนให้ได้ขนาดตัดอนุภาคเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และทำการทดลองปล่อยชีวมวลผงที่มี Shape factor เท่ากับ 0.6 เข้าสู่ไซโคลนเพื่อหาประสิทธิภาพในการคัดแยกและนำผลการทดลองมาตรวจสอบความแม่นยำกับผลการจำลองเชิงตัวเลข ในปี 2017 จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Xiaodong และคณะ [6] ทำการหาอิทธิพลของแรง Saffman ที่มีผลต่อเส้นทางของอนุภาคทรงกลมปล่อยเข้าสู่ไซโคลน พบว่าอนุภาคที่มีขนาด 7.5 ถึง 20 ไมครอน แรง Saffman มีผลกระทบต่อเส้นทางเดินอนุภาคและประสิทธิภาพไซโคลน และงานวิจัยของ Lin Liu และ คณะ [12] พบว่าเมื่อปล่อยอนุภาคเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งจุดปล่อยบริเวณทางเข้าไซโคลนต่างกันจะมีผลทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคแตกต่างกันและมีผลต่อประสิทธิภาพไซโคลน หรือไม่ และ อย่างไร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษานามการไหลและเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่จุดปล่อยตำแหน่งต่างๆบริเวณทางเข้าไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที เปรียบเทียบแรง Saffman และปรับมุมตกของทางเข้าไซโคลนที่ 3 และ 5 องศา

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมของสนามการไหลที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข
2. ศึกษาเส้นทางเดินอนุภาคที่ได้จากการหาขนาดตัดของอนุภาค (cut size diameter) เมื่อเข้าสู่ไซโคลนที่จุดปล่อยแต่ละตำแหน่งบริเวณทางเข้าไซโคลน ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข
3. ศึกษาและเปรียบเทียบวิเคราะห์อิทธิพลของแรง Saffman ที่มีผลต่อเส้นทางเดินชีวมวลผงเมื่อเข้าสู่ไซโคลนด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข
4. ศึกษาเส้นทางเดินชีวมวลผงเมื่อปรับมุมของทางเข้าไซโคลนที่ 3 และ 5 องศา

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. ถ้าแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับหาสนามการไหลภายในไซโคลน ที่ใช้ในการจำลองเพื่อทำนายปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมีความแม่นยำ จะสามารถดูเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละขนาดที่เข้าสู่ไซโคลนได้ถูกต้องมากขึ้น
2. ถ้าความเร็วที่ทางเข้าของไซโคลนมีผลต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลน โดยความเร็วทางเข้าไซโคลนสูงจะทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของไซโคลนดีกว่าในกรณีที่ป้อนด้วยความเร็วต่ำกว่า
3. ถ้าแรงต่างๆมีอิทธิพลต่อชีวมวลผงที่เข้าสู่ไซโคลน จึงได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อให้มีความแม่นยำในการทำนายมากขึ้น
4. ตำแหน่งที่ทางเข้าของไซโคลนจะมีผลต่อเส้นทางเดินอนุภาคที่ต่างกัน จึงได้ทำการศึกษาค่าตำแหน่งต่างๆบริเวณทางเข้าของไซโคลนเพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข
5. ถ้ามุมการตกของชีวมวลผงมีผลต่อเส้นทางเดินชีวมวลผง จึงได้ทำการศึกษามุมของทางเข้าไซโคลนที่ 3 และ 5 องศา

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาสนามการไหลและเส้นทางเดินของชีวมวลผงภายในไซโคลน Stairmand แบบ High Efficiency ด้วยแบบจำลองตัวเลข
2. ศึกษาการกำหนดจุดปล่อยชีวมวลผงที่ตำแหน่งทางเข้าของไซโคลน
3. เปลี่ยนความเร็วที่ทางเข้าเท่ากับ 8 และ 10 เมตรต่อวินาที
4. ศึกษาเส้นทางเดินชีวมวลผงที่มุมทางเข้าไซโคลนเท่ากับ 3 และ 5 องศา

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย
2. สืบค้น และศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบไซโคลน
3. ออกแบบและคำนวณโครงสร้างอุปกรณ์การทำงานของไซโคลนเพื่อใช้ในการดักจับชีวมวลผง
4. ดำเนินการจัดสร้างระบบและติดตั้งไซโคลนเพื่อคัดแยกขนาดของชีวมวลผง
5. ออกแบบการทดลองพร้อมทั้งดำเนินการทดสอบหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลนและกำหนดความเร็วที่ทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

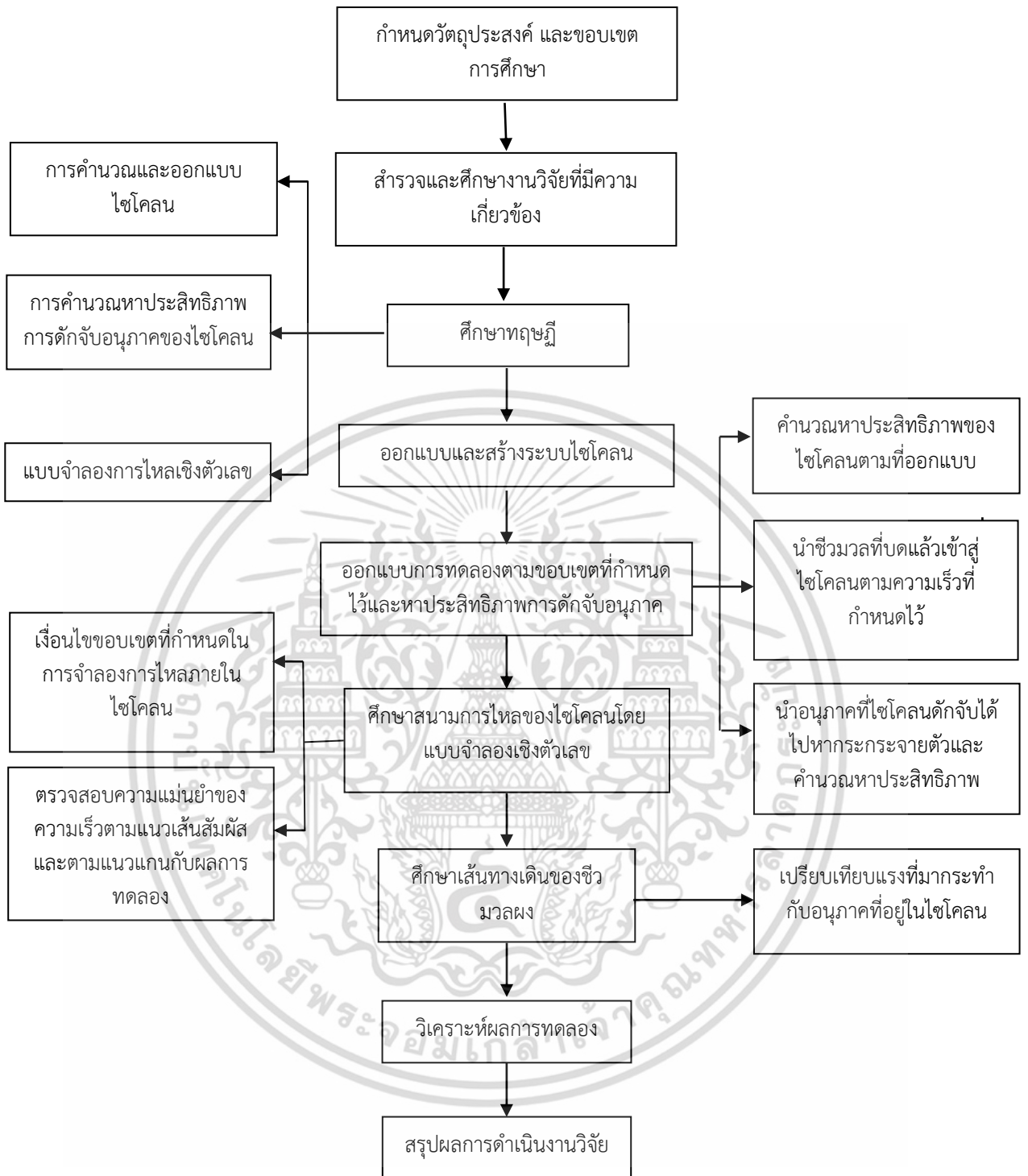
6. ทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคที่ไซโคลนดักจับได้เพื่อทำการหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่ได้จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ
7. ทำการวิเคราะห์สนามการไหลของไซโคลนโดยแบบจำลองเชิงตัวเลขตามเงื่อนไขการทดลองที่กำหนด
8. ทำการวิเคราะห์เส้นทางเดินของอนุภาคเมื่อเข้าสู่ไซโคลนแบบจำลองเชิงตัวเลข และเปรียบเทียบกับแรงต่างๆที่มากระทำ
9. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา และปรับปรุง พร้อมทั้งสรุปผลการดำเนินโครงการ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผู้ที่ทำงานวิจัยนี้มีความรู้และเข้าใจในหัวข้อที่ทำการศึกษาและวิจัยเพิ่มขึ้น
2. ข้อมูลและผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองตัวเลขสามารถนำไปเผยแพร่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เส้นทางเดินอนุภาคและการออกแบบไซโคลนสำหรับระบบที่มีขนาดแตกต่างกันไป หรือระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

จากบทที่หนึ่งได้ทราบแล้วว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นในด้านศึกษาเส้นทางเดินของชีวมวลผงภายในไซโคลน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาไซโคลนให้มีความเหมาะสมสำหรับคัดแยกชีวมวลผง (Pulverized Biomass) ซึ่งในการออกแบบนั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการการทำงานของไซโคลน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งต้องศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด คุณสมบัติ และปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคัดแยกของไซโคลน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สัดส่วนไซโคลน Stairmand แบบ High Efficiency ในการออกแบบเพื่อการศึกษาและทดลอง โดยในงานวิจัยก่อนหน้ามีดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dargo และ Leith (1985) [1] ทำการวัดประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคและความดันตกคร่อมของไซโคลนแบบ Stairmand ที่อัตราการไหลที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ค่าและเปรียบเทียบผลของการวัดกับทฤษฎีทั้ง 4 รูปแบบจำลอง และพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองให้ค่าที่ต่ำกว่าเมื่อความเร็วขาเข้าน้อยกว่า 10 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้แบบจำลองของ Barth ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับทุกช่วงของความเร็วขาเข้า ด้วยเหตุผลที่ว่าสมมติฐานในของแบบจำลอง Leith-Licht , Lapple และ Dietz คือรูปแบบที่สมบูรณ์หลังจากการผสมอนุภาคที่ไม่ดักจับโดยไซโคลนเพราะฉะนั้นอนุภาคจะถูกแรงบังคับเคลื่อนที่เข้าไปยังบริเวณวงแหวนของกระแสอากาศหมุนวน ก่อนที่อนุภาคจะหลุดออกจากไซโคลน ในความเป็นจริงแล้วอนุภาคจะย้อนกลับชนผนังของไซโคลน

Kim และ Lee (1990) [2] ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค ประกอบด้วยขนาดอนุภาค อัตราการไหล ขนาดท่อทางออก และเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลน โดยทดสอบด้วยรูปทรงแตกต่างทั้งหมด 9 รูปทรง พบว่า ตัวแปรต่าง ๆ นั้นส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไซโคลน เพราะตัวแปรเหล่านี้จะควบคุมการเกิดกระแสอากาศหมุนวนในรูปแบบต่างๆ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลกราฟของการดักจับอนุภาคของไซโคลนก็ชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสมีค่าสูงขึ้น และเมื่อลดขนาดท่อทางออกพบว่าประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเพราะวงแหวนของกระแสอากาศหมุนวน (หมุนขึ้น) โดยเป็นสัดส่วนกับขนาดท่อทางออก เพราะฉะนั้นมีโอกาสที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างไซโคลนมากขึ้น นอกจากนี้ Kim และ Lee ได้พิจารณาตัวแปรรัศมีหน่วยท่อทางออกของไซโคลนไปยังขนาดของตัวไซโคลนเท่ากับ 0.5 อย่างไรก็ตาม ความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งถ้ามิติของท่อทางออกมากกว่า 0.5 สุดท้ายแล้วผลกระทบของขนาดไซโคลนต่อขนาดตัดของอนุภาค เมื่อตัวไซโคลนมีขนาดใหญ่มากเกินไปด้วยนั้นขนาดตัดอนุภาคที่ปรากฏจะลดลงเพราะเกิดการไหลที่เปลี่ยนแปลง

Hoekstra, Derksen และ Akker (1999) [3] เปรียบเทียบรูปแบบความเร็วระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ K-epsilon และ RNG K-Epsilon turbulent โดยใช้ Laser-  
เอกสาร Döppler Velocimetry (LDV) เพื่อทำการวัดความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) ค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความเร็วตามแนวแกน (Axial Velocity) สำหรับตรวจสอบกับแบบจำลองทั้งสอง การไหลของของไหลในไซโคลนขนาดเล็กจะได้รับผลกระทบอย่างมากจากจำนวนการหมุน ลักษณะนี้จะเป็นอัตราส่วนของความเร็วตามแนวแกน (Axial Velocity) ต่อความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) ดังนั้นแนะนำว่า Reynold Stress Model (RSM) มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับผลการทดลองสำหรับการไหลของไซโคลนมากกว่า K-Epsilon และ รูปแบบ RNG-K-Epsilon อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขของรูปแบบ Reynold Stress จะมากกว่า K-Epsilon และรูปแบบ RNG-K-Epsilon

Hoekstra, Derkson และ Akker (2000) [4] ได้ทำนายประสิทธิภาพของไซโคลนโดยหาความดันตกคร่อมและขนาดตัดของอนุภาค (Cut Size Diameter) ด้วยวิธีจำลองการไหลเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics : CFD) ในการออกแบบได้เลือกใช้ไซโคลนประสิทธิภาพสูงแบบ Stairmand เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างและเงื่อนไขในการดำเนินการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไซโคลน Reynolds Stress Transport Model จะถูกประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการไหลแบบหมุน (Swirling Flow) เส้นโค้งที่แสดงประสิทธิภาพการคัดแยกแต่ละระดับจะทำนายด้วยการติดตามอนุภาคแบบสุ่ม (Stochastic) โดยอาศัยวิธีการตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว, ผลกระทบของค่า Reynolds Number กับประสิทธิภาพไซโคลนของรูปร่างของไซโคลนทั้ง 4 แบบที่ถูกจำลองขึ้น ผลที่ได้เน้นพบว่ามีผลสำคัญในหาสัดส่วนของไซโคลนที่เหมาะสมในการออกแบบทางวิศวกรรม

J.J. Derkson และคณะ (2003) [5] เปรียบวิธี Large-Eddy Simulations (LES) จะถูกปฏิบัติใช้ในการทำนายการไหลในไซโคลนประสิทธิภาพสูงแบบ Stairmand ที่ Reynolds Number เท่ากับ 280,000 โดย LES แสดงในรูปแบบ 3 มิติที่เสมือนจริง time dependent flow รวมถึงปรากฏการณ์เช่น กระแสอากาศหมุนวนที่เปลี่ยนโครงสร้างของการไหลซึ่งได้ผลที่มีคุณภาพและสอดคล้องกับผลการวัดโปรไฟล์ความเร็วทั้ง time average velocities และ ระดับความปั่นป่วนของความเร็ว โดยในรูปแบบของ LES ได้กำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ One-Way Coupling ระหว่างอนุภาคและสนามการไหลโดยจะแสดงให้เห็นรายละเอียดที่บริเวณเล็กน้อยของการไหล โดยพบว่าทางเข้าไซโคลนมีผลกระทบอย่างมากต่อกระบวนการคัดแยกอนุภาค เนื่องจากช่วงเวลาในการคำนวณที่เพียงพอของการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน เพราะการจำลองการไหลของก๊าซและการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นจะใช้เวลานาน เพราะฉะนั้นจากการสำรวจพบว่าที่สามรูปแบบสำหรับการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ frozen-field approach, eddy lifetime model และ periodic-flow approach โดยจะเปรียบเทียบผลของทั้งสามรูปแบบนี้จากการจำลองเชิงตัวเลข (CFD Simulation)

Xiaodong และคณะ (2003) [6] ทำการหาอิทธิพลของโครงสร้างความปั่นป่วนโดยจะแสดงการคำนวณขั้นพื้นฐานของการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอนุภาคและแก๊ส และศึกษาผลกระทบของโครงสร้างความปั่นป่วนและความหนาของชั้นวัสดุของไซโคลน และวิเคราะห์ผลกระทบของแรง Saffman (Saffman Force) ต่อเส้นทางเดินของอนุภาค ผลบ่งชี้ว่าประสิทธิภาพการคัดแยกไซโคลนลดลงโดยการเพิ่มความเข้มข้นความปั่นป่วน แรง Saffman สามารถเพิ่มการคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากและสามารถให้ Residual Time ที่สั้นลงในไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jiao และคณะ (2007) [7] ได้ทำนายนามการไหลโดยใช้รูปแบบการปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) และทำการตรวจสอบโดยใช้ผลการทดลองจากการวัดความเร็วของอนุภาคจากภาพถ่าย (Particle Imaging Velocimetry) การตรวจสอบส่วนใหญ่เน้นทั้งสองคุณสมบัติของการค่าเฉลี่ยของการไหลและความผันแปรของสนามการไหลซึ่งส่วนใหญ่สามารถสะท้อนถึงคุณสมบัติการไหลแบบปั่นป่วนภายในไซโคลน เปรียบเทียบระหว่างการทำนายและการวัดพบว่ารูปแบบ RSM มีประสิทธิภาพการทำนายค่าเฉลี่ยของสนามการไหลได้ดี โดยเฉพาะทำนายความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบ RSM มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างแย่ในการทำนายความผันแปรของสนามการไหล ค่าสัมประสิทธิ์ในรูปแบบมาตรฐานของรูปแบบ RSM ต้องมีการปรับเปลี่ยนเพื่อเพิ่มความแม่นยำเมื่อนำมาใช้ในการทำนายโครงสร้างของความผันแปรในการหมุนวนที่รุนแรง โดยค่าสัมประสิทธิ์ของรูปแบบที่แนะนำนั้นให้ความแม่นยำที่ดีขึ้นในการทำนายการผันแปรของสนามการไหลมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์มาตรฐานโดยที่ไม่ให้ความแม่นยำในการทำนายนามการไหลลดลง

Elsayed และคณะ (2010) [8] ตรวจสอบผลกระทบของความสูงไซโคลนที่มีผลต่อประสิทธิภาพและรูปแบบสนามการไหลโดยใช้คำนวณในรูปแบบ Large Eddy Simulation (LES) สำหรับไซโคลนทั้ง 5 แบบ แสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) ในไซโคลนลดลงเมื่อมีการเพิ่มความสูงของไซโคลน ไม่มีการเร่งความเร็วเกิดขึ้นในพื้นที่ไซโคลน ( ค่าสูงสุดของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสจะมีค่าคงที่อยู่ตลอดทั้งไซโคลน) เมื่อเพิ่มความสูงของไซโคลนจะพบว่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) จะลดลง (แต่จะมีการลดลงหลังจากปรับปรุงความไซโคลนเท่ากับ  $Ht / D = 5$  ) โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงแต่เพิ่มความสูงของไซโคลน ประสิทธิภาพรวมของไซโคลนลดลงเนื่องจากความแรงของกระแสอากาศหมุนวนในไซโคลนลดลงมากขึ้น

Safikhani และคณะ (2010) [9] การจำลองเชิงตัวเลขของสนามการไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ถูกแสดงโดยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Simulation) เพื่อดูประสิทธิภาพของไซโคลนมาตรฐานทั้งสามแบบ โดยไซโคลนทั้งสามแบบจะมีชื่อว่า  $1D3D$ ,  $2D2D$  และ  $1D2D$  ความยาวในส่วนทรงกระบอกไซโคลนจะเท่ากับ 1,2 และ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกไซโคลนตามลำดับ และความยาวกรวยไซโคลนคือ 3,2 และ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน สมการ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) และ ใช้แก้สมการ Reynolds Stress Turbulence Model (RSM) ได้โดยใช้ Finite Volume Method ขึ้นอยู่กับ SIMPLE Pressure ในการแก้ไข Algorithm ในการคำนวณหลัก และใช้ขั้นตอนการคำนวณของ Eulerian-Lagrangian เพื่อทำนายการติดตามอนุภาคที่อยู่ภายในไซโคลน ความผันแปรของความเร็วจะใช้ Discrete Random Walk Model (DRM) ในการจำลอง การตรวจสอบความสัมพันธ์ของไซโคลนและเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนและขนาดตัดอนุภาค (Cut Size Diameter) สามารถคำนวณได้จากการกระจายตัวของอนุภาค และนำผลการคำนวณเชิงตัวเลขมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองและรูปแบบทางทฤษฎีที่มีความสอดคล้องกัน

Shukla และคณะ (2011) [10] การจำลองแบบ Steady State และ Unsteady State ของไฮโดรไลซิส Stairmand จะดำเนินการตรวจสอบประสิทธิภาพที่แตกต่างของการแก้ไขรูปแบบของ Pressure gradient และ Advection Term ได้ศึกษารูปแบบความปั่นป่วน RSM เพื่อนำมาสำรวจความสามารถในการจำลองของปรากฏการณ์ PVC และความผันแปรของรูปแบบความเร็วของไฮโดรไลซิสพบว่า การจำลองรูปแบบ Steady State ไม่สามารถทำนายรูปแบบความเร็วและความดันตกคร่อมในไฮโดรไลซิสได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่รูปแบบ Unsteady State สามารถทำนายรูปแบบความเร็ว, ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) และ PVC มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยในตารางที่ 2.1 จะระบุรูปแบบการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ที่ต่างกันในการจำลองการไหลของไฮโดรไลซิส Stairmand แบบ High Efficiency เพื่อหาประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไข Steady State และ Unsteady State โดยจะเปรียบเทียบผลที่จำลองได้กับผลการทดลอง

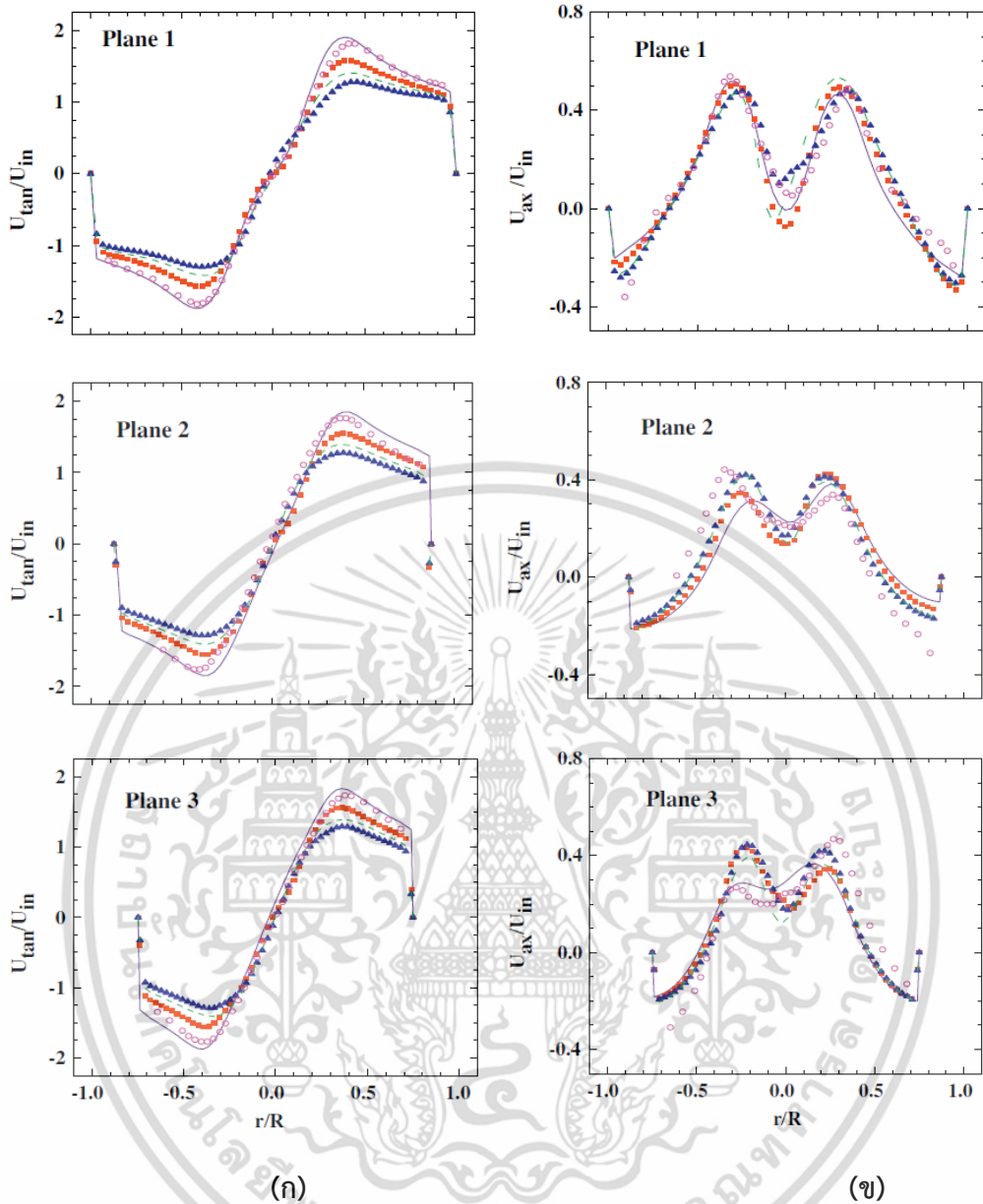
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดรูปแบบการคำนวณที่ใช้ประมวลผลในการจำลองไฮโดรไลซิส

	Ds1	Ds2	Ds3	Ds4	Ds5	Ds6	Ds7	Ds8	Ds9
Pressure	Presto	Presto	SOU	Standard	BFW	Presto	Presto	Presto	Presto
Momentum, $k, \varepsilon$	FOU	Power Law	SOU	SOU	SOU	SOU	Quick	MUSCL	Quick
Reynolds Stress	FOU	FOU	FOU	FOU	FOU	FOU	FOU	FOU	Quick

การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองแบบ Steady State และ Unsteady State ในตารางที่ 1.2 จะพบว่าการทำนายความดันตกคร่อมด้วยการจำลองแบบ Steady สำหรับ High order Schemes กับรูปแบบ Presto เท่ากับ 16-20% ในขณะที่รูปแบบ Non-Presto (Ds4 และ Ds5) เท่ากับ 14-26% แม้ว่าความดันตกคร่อมที่ทำนายด้วยรูปแบบ Steady State สำหรับ Ds3 จะใกล้เคียงผลการทดลอง -3% แต่ให้ผลการทำนายที่แย่มากกว่าการหารูปแบบความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีแนวโน้มความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ไปตามทิศทางการไหล เพราะฉะนั้นการทำนายความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ด้วยการจำลองแบบ Steady State สำหรับรูปแบบ Ds3 อาจจะถูกพิจารณาว่า Fictitious ซึ่งทำให้เกิดการลู่เข้า (Converge) ได้ง่ายด้วยรูปแบบ first order accurate advection convection (Ds1 และ Ds2) และรูปแบบ Steady State มีการจำลองที่สามารถลู่เข้า (Converge) จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบรูปแบบ Pressure Discretization จากรูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบของรูปแบบความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกนที่บริเวณกึ่งกลางของเส้นรัศมีจนถึงผนังกับผลที่ได้จากการทดลองสำหรับการแก้ไขของรูปแบบที่ต่างกันของความดัน (Ds3 ถึง Ds 6) ที่ระนาบ 1,2 และ 3 ที่รูปแบบ Presto (Ds6) จะทำนายทั้งความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 2.1ก ความเร็วตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 2.1ข มีค่าใกล้เคียงผลการทดลองที่วัดได้ในโดเมนของไฮโดรไลซิส ในขณะที่รูปแบบ Non Presto เช่น SO, Standard and BFW (Ds3, Ds4 และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ds5) มีการทำนายที่ไม่ถูกต้องกับความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกนโดยเฉพาะในวงแหวนของกระแสอากาศหมุนวนด้านนอก (i.e.,  $r/R = 0.25 - 0.5$ ) และช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ (i.e.,  $r/R = 0.25 - 0.5$ ) และความเร็วตามแนวแกนที่แกนของกระแสอากาศหมุนวน อย่างไรก็ตามการทำนายของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกนที่แต่ละการแก้ไขของรูปแบบความดันมีค่าเหมือนกันและใกล้เคียงกับผลการทดลองของกระแสอากาศหมุนวนด้านในและกระแสอากาศหมุนวนด้านนอก ปรากฏการณ์ของ PVC และการไหลย้อนกลับกับค่าติดลบที่แกนของกระแสอากาศหมุนวนด้านใน เกิดจากการลดลงของความเร็วอย่างรวดเร็วตั้งนั้นรูปแบบ Presto จึงไม่สามารถจำลองความเร็วตามแนวแกนที่แกนของกระแสอากาศหมุนวนได้อย่างแม่นยำ แม้ว่าผลการทดลองของความดันสถิตที่กระจายตัวจะไม่สอดคล้อง โดยการทำนายที่แม่นยำของความดันตกคร่อมและความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสในโดเมนของไซโคลนได้โดยรูปแบบ Presto (Ds6) แม้ว่าความดันสถิตที่กระจายตัวจะถูกทำนายได้แม่นยำด้วยรูปแบบนี้ แสดงได้จากรูปที่ 2.1 นั้นพบว่ารูปแบบ Non Presto ภายใต้การทำนายของความดันสถิตให้การทำนายความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกนที่ไม่แม่นยำ ภายใต้การทำนายของความดันสถิตคือสิ่งสำคัญในกระแสอากาศหมุนวนรอบนอกซึ่งจะแสดงถึงความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแก้ไขรูปแบบความดัน Non Presto นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการจำลองของไซโคลน โดยหลักแล้วจะขึ้นอยู่กับ order advection และ รูปแบบ Presto ที่สูงกว่า

จากการศึกษาประเมินผลประสิทธิภาพไซโคลนแบบ Stairmand ภายใต้การจำลองรูปแบบสถานะคงที่ (Steady State) และสถานะไม่คงที่ (Unsteady State) สามารถทำนายความดันตกคร่อม ความดันสถิตที่กระจายแต่ละตำแหน่ง และรูปแบบความเร็ว โดยพบว่าการจำลองแบบสถานะไม่คงที่ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ในขณะที่การทำนายของตัวแปรแบบสถานะคงตัวนั้นให้การจำลองที่ไม่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยยืนยันว่าการแก้ไขรูปแบบความดัน Non Presto รูปแบบตามมาตรฐานนั้น SO และ BFW ไม่สามารถทำนายความเร็ว ความดันตกคร่อมและความดันสถิตที่กระจายในไซโคลนได้แม่นยำ ในขณะที่การทำนายของตัวแปรจากการแก้ไขรูปแบบความดัน Presto ให้ผลที่ดีกับการวัดค่าในโดเมนไซโคลน สำหรับรูปแบบ First Order Advection นั้นให้การจำลองที่ไม่ถูกต้อง ในขณะที่รูปแบบ Higher Order Upwind ให้การจำลองที่ดี แนวโน้มทั้งหมดของการทดลองความเร็วที่ไม่คงที่นั้นให้ผลการจำลองที่สำเร็จทั้งในแกนกระแสอากาศหมุนวนและนอกแกนกระแสอากาศหมุนวนด้วยการจำลองในรูปแบบ Higher Order Upwind ดังนั้นการจำลองการไหลในไซโคลนโดยการใช้รูปแบบการแก้ไขความดันที่เหมาะสมที่สุดคือรูปแบบ Ds6 ซึ่งสามารถให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 2.1 (ก) ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส ( $U_{tan}/U_{in}$ ) และ (ข) ความเร็วในทิศทางตามแนวแกน ( $U_{Ax}/U_{in}$ ) สำหรับการแก้ไขรูปแบบความดันที่ระนาบ 1,2 และ 3 ■ Ds3; ▲ Ds4; ■■ Ds5; ■■■ Ds6; ○ และผลการทดลอง [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Shukla และคณะ (2011) [11] ศึกษาประสิทธิภาพของรูปแบบที่แตกต่างสำหรับการจำลองของระยะการกระจาย (dispersed phase) ในไซโคลนโดยใช้รูปแบบ Reynolds Stress Turbulence ของโปรแกรมฟลูเอนท์ การไหลแบบต่อเนื่องในไซโคลนนั้นได้ถูกวิเคราะห์ผลการคำนวณได้แสดงว่ารูปแบบ High Order Discretization ให้ประสิทธิภาพในการจำลองการกระจายตัวของอนุภาคของทุกขนาดได้ดี อย่างไรก็ตามการทำนายในรูปแบบ Trapezoidal Discretization สามารถได้ผลที่ดีกว่ารูปแบบ Runge-Kutta รูปแบบของ Low Order และการรวมกันของรูปแบบทั้ง Low Order และ High Order ให้การทำนายที่ไม่แม่นยำกับการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากและประสิทธิภาพของไซโคลน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้แนะนำวิธีการจำลองการกระจายตัวของอนุภาคในไซโคลนที่ได้ผลดีคือรูปแบบ Trapezoidal



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะนำเสนอถึงทฤษฎีต่างๆและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อศึกษาเส้นทางเดินของชีวมวลผงภายในไซโคลน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาไซโคลนให้มีความเหมาะสมสำหรับคัดแยกเชื้อเพลิงชีวมวลผง (Pulverized Biomass) โดยในไซโคลนทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นทรงกรวยและทรงกระบอก ของไหลจะไหลไปยังส่วนของทรงกระบอกตามแนวเส้นสัมผัสก่อนที่จะหมุนวนลงสู่ทรงกรวย ซึ่งในเบื้องต้นเราจะต้องทำการศึกษาในส่วนนี้และในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการออกแบบไซโคลนได้แก่ หลักการออกแบบและคำนวณประสิทธิภาพไซโคลน และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นต้น

### 3.1 หลักการออกแบบไซโคลน

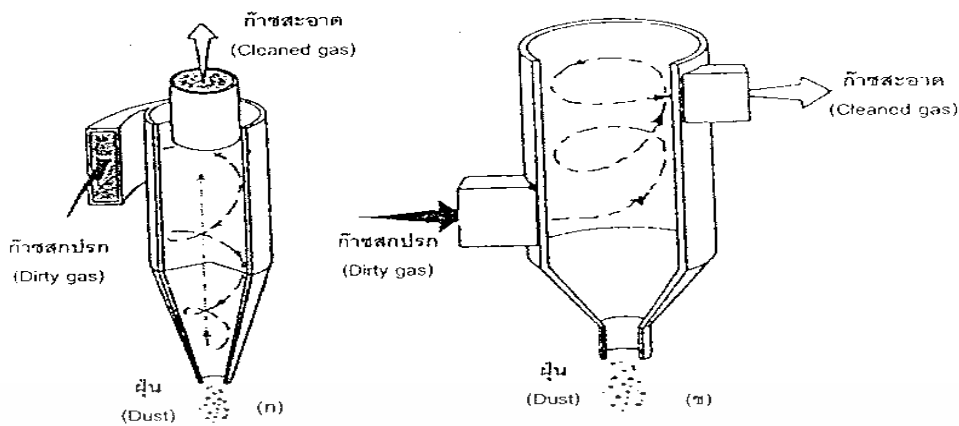
ไซโคลน เป็นเครื่องมือคัดแยกอนุภาคออกจากอากาศโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศหมุนวน (vortex) ซึ่งทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไซโคลน กระแสหมุนวนนี้จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณเกือบปลายกรวยไซโคลนและอากาศจะหมุนวนย้อนกลับขึ้นมาเป็นกระแสอากาศหมุนวนที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม (Core Vortex) และเคลื่อนที่ไปยังทางออกด้านบนของไซโคลน ดังนั้นไซโคลนจึงมีกระแสอากาศหมุนวน 2 ชั้น (Double Vortex) สำหรับอนุภาคที่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังไซโคลนเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ลงไปยังส่วนล่างของไซโคลนและออกไปยังทางออกด้านล่างเข้าสู่ถังพัก (Dust Bin) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากและอากาศก็จะหมุนวนออกไปที่ทางออกด้านบนของไซโคลน โดยกลไกในการจับอนุภาคมี 2 อย่าง คือ

1. แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เกิดจากการทำให้เกิดกระแสอากาศหมุนวนซึ่งทำให้อนุภาคเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลน
2. แรงถ่วง (Gravity Force) เมื่ออนุภาคเกิดการหมุนวนและเคลื่อนที่ถึงผนังไซโคลนแล้วอนุภาคที่หนักจะได้รับแรงถ่วงทำให้อนุภาคตกลงไปที่ถังพักด้านล่าง

#### 3.1.1 ชนิดของไซโคลน

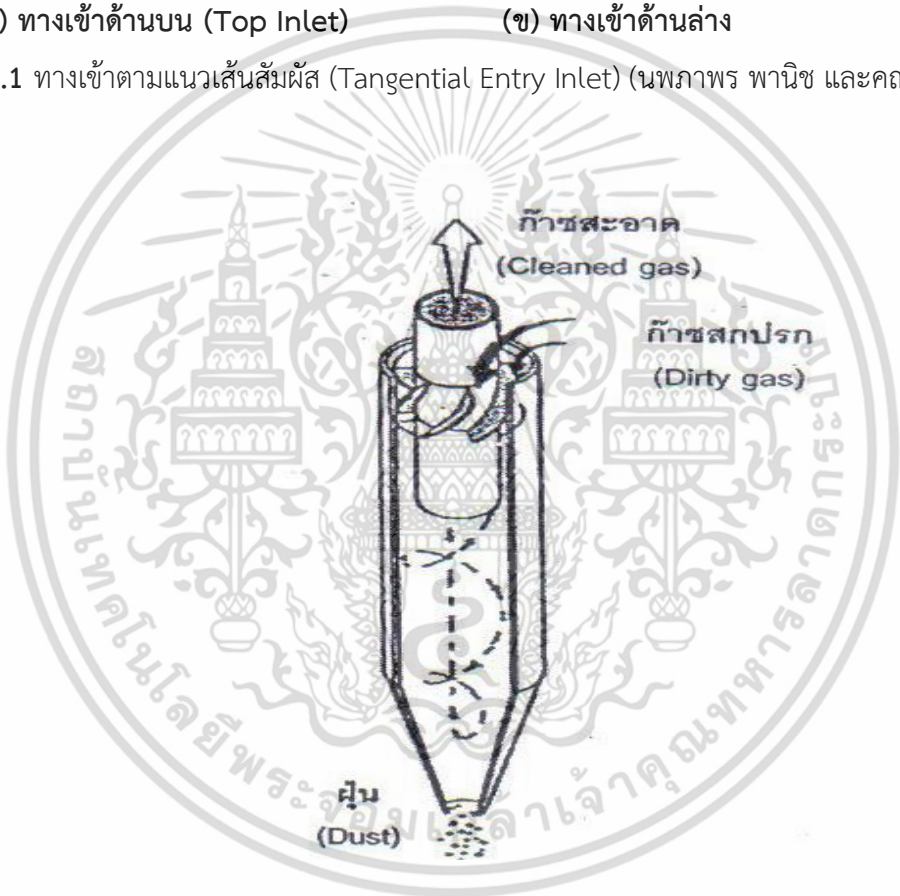
โดยจะแบ่งตามลักษณะของการหมุนและทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ จะแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. ไซโคลนแบบทางเข้าตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Entry Inlet) ดังแสดงในรูปที่ 3.1
2. ไซโคลนแบบทางเข้าตามแนวแกน (Axial Entry Inlet) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก) ทางเข้าด้านบน (Top Inlet)                      (ข) ทางเข้าด้านข้าง

รูปที่ 3.1 ทางเข้าตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Entry Inlet) (นพภาพร พานิช และคณะ, 2550 )



รูปที่ 3.2 ไชโคลนทางเข้าตามแนวแกน(Axial Entry Inlet) (นพภาพร พานิช และคณะ,2550)

อากาศจะไหลเข้าสู่ไชโคลนตามแนวเส้นสัมผัสและเกิดกระแสวนอากาศหมุนวน (Vortex) โดยที่ท่อเข้าส่วนใหญ่ของไชโคลนจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งจะมีผนังภายในค้อยๆโค้งจากนั้นจะเป็นส่วนทรงกระบอกของตัวไชโคลน สำหรับไชโคลนที่มีทางเข้าตามแนวแกน อากาศและอนุภาคจะเข้าสู่ไชโคลนตามแนวแกนโดยผ่าน vanes ซึ่งลักษณะนี้จะใช้มากในมัลติไชโคลน โดยจะมีการทำงานขึ้นกับความเฉื่อยของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเมื่ออากาศเปลี่ยนทิศทาง ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางดังกล่าว โดยส่วนใหญ่แล้วในการเลือกจะเลือกใช้เหล็กคาร์บอนหรือโลหะในการทำไชโคลน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเซรามิกส์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทดลองหรือใช้งานในการคัดแยกอนุภาค, การกักกรอง, การสีกลอ แต่ผิวภายในต้องมิลักษณะที่เรียบเพื่อให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ดีและไม่เกิดแรงเสียดทาน นอกจากนี้ไซโคลอนสามารถแบ่งออกเป็น แบบที่ใช้กันทั่วไป (Conventional Cyclones) และแบบที่มีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Cyclone) โดยจะแบ่งได้ทั้งหมด 3 ชนิด คือ ไซโคลอนที่มีประสิทธิภาพสูง ไซโคลอนที่ใช้กันทั่วไป และไซโคลอนที่รับอัตราการไหลสูง (High Volume Cyclone)

### 3.1.2 โครงสร้างและสัดส่วนของไซโคลอน

โครงสร้างและสัดส่วนของไซโคลอนจะสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ 1) แบบ High Efficiency และ 2) แบบ General โดยในไซโคลอนแบบ 1) High Efficiency จะสามารถแยกประเภทออกได้ 2 แบบตามการออกแบบสัดส่วนของไซโคลอน ได้แก่ 1.1) Stairmand และ 1.2) Swift โดยไซโคลอนแบบ 2) General Purpose จะแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ 2.1) Lapple, Swift, 2.2) Peterson และ 2.3) Whitby จะแสดงสัดส่วนของไซโคลอนทั้ง 2 แบบ ได้แก่ แบบ High Efficiency แสดงในตารางที่ 3.1 และแบบ General Purpose ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลอนแบบ High Efficiency

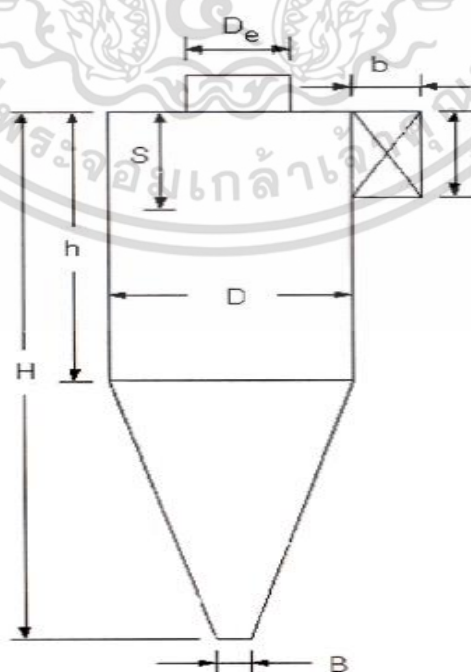
ส่วนประกอบ	สัดส่วนไซโคลอน (เมตร)	
	Stairmand	Swift
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000	1.000
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500	0.440
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.200	0.210
ความยาวช่องทางออก (S)	0.500	0.500
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D <sub>e</sub> )	0.500	0.400
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	1.500	1.400
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000	3.900
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.375	0.400

ตารางที่ 3.2 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ General Purpose

ส่วนประกอบ	สัดส่วนไซโคลน (เมตร)		
	Lapple	Swift	Peterson & Whitby
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000	1.000	1.000
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500	0.500	0.583
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.250	0.250	0.208
ความยาวช่องทางออก (S)	0.625	0.600	0.583
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D <sub>e</sub> )	0.500	0.500	0.500
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	2.000	1.750	1.333
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000	3.750	3.170
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.250	0.400	0.500

การหาขนาดไซโคลนทำโดยการเลือก configuration ratios แล้วหาขนาดของไซโคลนและความเร็วของแก๊สที่ไหลเข้า ทำให้หาขนาดและสัดส่วนของไซโคลนได้ ในกรณีที่ต้องการให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นมีค่าสูง ควรให้ความเร็วของแก๊สมีค่ามากที่สุดที่จะทำได้ โดยที่ไม่พังกระจายอีก Kalen และ Zenz ได้ประมาณค่า  $V_1$  ที่มากที่สุดที่จะเป็นได้โดยใช้สมการ 3.1

$$MaxV_1 = \frac{22.6g \mu P_{10} (B_c/D_c)^{1.2} D_c^{0.201}}{P_{10}^2 [1 - (B_c/D_c)]} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

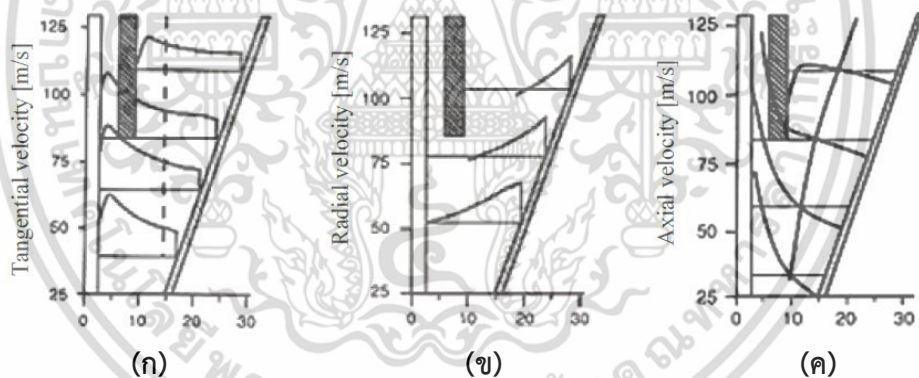
การออกแบบไซโคลนโดยใช้โครงแบบ (Configuration) อื่นๆนั้นจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

1.  $H \leq S$  เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นที่เข้ามาหลุดออกไปที่ท่อทางออก
2.  $H \geq 3D$  เพื่อให้กระแสนอนอยู่ภายในกรวยไซโคลน
3. มุมส่วนโคนจะประมาณ 7-8 องศาเพื่อช่วยให้ฝุ่นไหลลงง่าย

### 3.1.3 รูปแบบสนามการไหลของไซโคลน

แก๊สจะไหลเข้าสู่ไซโคลนตามแนวเส้นสัมผัสเข้าไปยังทรงกระบอกของไซโคลนก่อนที่จะหมุนวนลงสู่ด้านล่างที่กรวยไซโคลนจากนั้นกระแสอากาศหมุนวนได้หมุนย้อนขึ้นมาไปยังส่วนของท่อทางออก (Vortex Finder) ขณะเดียวกันในส่วนกระบอกไซโคลนอนุภาคจะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและอนุภาคขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ชนผนังของไซโคลนและตกลงสู่ถังพัก (Dust Bin) ในกระแสอากาศหมุนวนส่วนทรงกระบอกของไซโคลนนั้นจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนประกอบ ได้แก่ ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส, ความเร็วตามแนวแกน, และความเร็วตามแนวรัศมี หลายงานวิจัยได้พยายามที่จะวัดการเปลี่ยนของการไหลและประสิทธิภาพของไซโคลน โดยได้ตรวจสอบแกนของกระแสอากาศหมุนวนภายในไซโคลนซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของความเร็วที่ผันผวนตามที่ได้จากการทดลองโดยเครื่อง Laser Doppler Anemometry (LDA)

ในการวัดเพื่อทำการเปรียบเทียบกับกับรูปแบบทฤษฎี ในรูปที่ 3.4 จะแสดงส่วนประกอบของความเร็วในความเร็วระดับต่างๆของไซโคลนรูปแบบทั่วไป



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของความเร็วในความเร็วระดับต่างๆของไซโคลนรูปแบบทั่วไป [14]

รูป 3.4 (ก) ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) เป็นความเร็วที่สำคัญในการทำให้อนุภาคเกิดการคัดแยกขนาดเนื่องจากมีแรงหนีศูนย์กลาง โดยในส่วนของเร็วนี้จะมีค่าสูงมากบริเวณต่ำกว่าท่อทางออกด้านบนของไซโคลนเล็กน้อย ในรายละเอียดของความเร็วตามแนวสัมผัสของไซโคลนจะแสดงดังสมการ 3.2

$$v_t r^n = \text{Constant} \quad (3.2)$$

ในรูป 3.4 (-) จะแสดงความเร็วตามแนวรัศมี (Radial Velocity) ที่มีสองทิศทางโดยจะมีค่าเป็นบวกเมื่อความเร็วมีทิศทางพุ่งออกมาด้านนอกจากจุดศูนย์กลางของไซโคลน ในทางตรงข้ามหากความเร็วมีทิศทางพุ่งเข้าด้านในจะมีค่าเป็นลบ เป็นที่สังเกตว่าส่วนประกอบของความเร็วทั้งหมดนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าลบเล็กน้อยที่บริเวณส่วนบนของไซโคลน และในรูป 3.4 (ค) จะแสดงความเร็วตามแนวแกน (Axial Velocity) ในไซโคลน ทิศทางของความเร็วตามแนวแกนสามารถพุ่งขึ้นและลงได้ โดยทิศที่พุ่งขึ้นจะมีค่าบวกในทางกลับกันทิศพุ่งลงจะมีค่าลบ จุดเปลี่ยนที่แยกระหว่างของวงแหวนกระแสหมุนวนที่บังคับและวงแหวนกระแสหมุนวนอิสระคือบริเวณกึ่งกลางระหว่างระยะห่างจากผนังไซโคลนทั้งสองฝั่งที่บริเวณแกนกระแสหมุนวนตลอดทั้งไซโคลนนั้นจะพบว่าความเร็วจะมีค่าลบเนื่องจากความดันที่บริเวณนั้นมีค่าน้อยมากดังนั้นสนามการไหลจะมีทิศทางย้อนกลับขึ้นด้านบนเมื่อแกนกระแสหมุนวนมีค่าความดันต่ำมาก

### 3.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลนและกลไกการดักจับอนุภาคของไซโคลน

เส้นทางเดินของอนุภาคในไซโคลนสามารถคำนวณได้โดยการ Integrate สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในสมการดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law) แรงทั้งหมดที่กระทำต่อสมดุลของอนุภาคกับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาค โดยอนุภาคนั้นจะมีแรงที่หลากหลายมากระทำ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะพบว่าหลักๆแล้วจะมีทั้งหมด 3 แรง และความเร็วที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดังนี้

1) แรงต้านอากาศ (Drag Force) คือ แรงที่กระทำจะตรงกันข้ามกับทิศทางลมที่ผ่านโดยจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุต่างๆ อธิบายได้ว่าเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคทรงกลมจะเกิดแรงต้านอากาศในการเคลื่อนที่เพราะฉะนั้นทิศทางจะตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของของไหล โดยแรงต้านอากาศจะขึ้นกับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคกับของไหล, สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ, ความหนาแน่นของของไหล และ พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆและแรงต้านอากาศจะแสดงในสมการ 3.3

$$\bar{F}_D = \frac{1}{2} \rho_F A C_D (u_F - u_p)^2 \quad (3.3)$$

2) แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) คือ แรงที่ไม่เข้าสู่ศูนย์กลาง อากาศที่เคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องมือที่รูปร่างโค้ง เช่น ไซโคลน จะทำให้เกิดกระแสอากาศหมุนวนภายในไซโคลนและเกิดแรงเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไซโคลนเนื่องจากโมเมนตัม อนุภาคจะสูญเสียพลังงานจลน์ดังนั้นอนุภาคจะแยกออกจากกระแสอากาศ โดยแรงหนีศูนย์กลางจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่รอบจุดศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้มีแนวโน้มเคลื่อนที่ออกจากจุดกึ่งกลางของการหมุน โดยในสมการ 3.4 จะแสดงแรงที่ความเร็วตามแนวเส้นและความเร็วเชิงมุม

$$\bar{F}_C = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R \quad (3.4)$$

3) แรงโน้มถ่วง (Gravity Force) คือแรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกดึงดูดสิ่งของขนาดเล็กสิ่งของต่างๆที่อยู่ในโลกจะมีแรงดึงดูดของโลกมากระทำให้สิ่งของนั้นมีทิศทางลงสู่ด้านล่างที่ศูนย์กลางของโลก โดยนิยามของแรงโน้มถ่วงจะมีส่วนของน้ำหนักเกี่ยวข้องจะแสดงในสมการ 3.5 ในกรณีนี้ไซโคลนมีการหมุนสูงๆ อัตราส่วนระหว่างแรงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงของโลกจะอยู่ในช่วง 100 ถึง 20,000 ดังนั้นแรงโน้มถ่วงจึงมีอิทธิพลที่ไม่มากนักต่อการดักจับอนุภาค

$$\bar{F}_G = m\bar{g} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.5 แสดงสองแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่เกิดจากการหมุนวนด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) จะเกิดขึ้นโดยความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) และแรงต้านอากาศ (Drag Force) ที่เกิดจากความเร็วของของไหลตามแนวรัศมี (Fluid Radial Velocity) โดยแรงทั้งสองจะมีทิศทางตรงข้ามที่จุดกึ่งกลางแรงต้านอากาศ (Drag Force) จะมีทิศทางพุ่งเข้าหาศูนย์กลาง แรงหนีศูนย์กลางจะมีทิศทางพุ่งออก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าแรงต้านอากาศที่มีทิศทางพุ่งเข้าศูนย์กลางมีขนาดใหญ่กว่าแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ที่มีทิศทางพุ่งออก อนุภาคจะถูกติดตามและมีทิศทางพุ่งเข้า ในทางตรงกันข้ามอนุภาคที่เคลื่อนที่ชั้นผนังของไซโคลนเมื่อแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) มากกว่าแรงต้านทานอากาศ (Drag Force)



รูปที่ 3.5 ทิศทางของแรงที่กระทำต่ออนุภาค [17]

4) ความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) เป็นความเร็วตกอิสระของอนุภาคของอนุภาคเม็ดของแข็งในของไหลอยู่หนึ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากไซโคลนไป โดยสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง

กรณีอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างทรงกลม

$$U'_t = \left[ \frac{18}{(d'_p)^2} + \frac{0.591}{(d'_p)^{1/2}} \right] \quad (3.6)$$

กรณีอนุภาคของแข็งที่ไม่เป็นทรงกลม

$$U^*_t = \left[ \frac{18}{(d^*_p)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d^*_p)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 จะอยู่ในรูปของตัวแปร  $U'_t$  และ  $d^*_t$  ซึ่งเป็นเทอมของตัวแปรไร้หน่วยโดยที่

$$d^*_p = d_p \left[ \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_t^* = U_t \left[ \frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_s - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (3.9)$$

ดังนั้นจาก  $U_t^*$  ที่ได้จากสมการที่ 3.7 และ 3.9 นำมาหา  $U_t^*$  โดยอาศัยสมการที่ 3.10 จะได้

$$U_t = U_t^* \left[ \frac{\mu \rho_s - \rho_g}{\rho_g^2} g \right]^{1/3} \quad (3.10)$$

### 3.2 ประสิทธิภาพการคัดแยกของไซโคลน (Collection Efficiency)

ประสิทธิภาพการคัดแยกของไซโคลนและความดันตกคร่อมคือตัวแปรที่สำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลน ความหมายประสิทธิภาพของไซโคลนแล้วคือความสามารถในการดักจับอนุภาคได้ ในขณะที่ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) คือพลังงานที่ไซโคลนต้องการเพื่อใช้ในดำเนินการ ซึ่งในการออกแบบไซโคลนทั่วไปต้องการให้มีประสิทธิภาพในการคัดแยกที่สูงและมีความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ต่ำ ในการหาประสิทธิภาพของไซโคลนจะต้องทำการคำนวณตัวแปรต่างๆแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ขนาดตัดอนุภาค (Cut Size Diameter) คือ ขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50% นั่นคืออนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัดจะถูกไซโคลนจับด้วยประสิทธิภาพมากกว่า 50% ขนาดตัดของอนุภาคขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของแก๊สและอนุภาค ขนาดของไซโคลน และสภาวะการเดินเครื่อง (Operating Contains) สมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดตัดของอนุภาคได้จากสมการ 3.11 ของ Lapple (1951) โดยใช้หลักการสมดุลแรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) และแรงต้านทางอากาศ (Drag Force) ที่กระทำในไซโคลน

$$d_{pc} = \left( \frac{9\mu_g b}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

2) ประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาค ได้มีสมการหลายอย่างเพื่อใช้หาประสิทธิภาพของไซโคลน ในรูป Fractional Efficiency หมายถึง สัดส่วนอนุภาคขนาดหนึ่งที่ถูกที่ถูไซโคลนดักจับได้เมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดนั้นที่เข้าสู่ไซโคลน โดยจะใช้สมการ 3.12

$$n_{ij} = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} \quad (3.12)$$

3) จำนวนการหมุนประสิทธิภาพ (N<sub>e</sub>) คือจำนวนครั้งที่กระแสอากาศมีการหมุนวนในไซโคลน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.13

$$N_e = \frac{1}{a} \left[ h + \frac{H-h}{2} \right] \quad (3.13)$$

4) ประสิทธิภาพในการดักจับรวม ในการคำนวณหาประสิทธิภาพรวมจะต้องหาการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของฝุ่นที่เข้าสู่ไซโคลน ดังสมการ 3.14

$$\eta = \sum \eta_i f_i \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคัดแยกอนุภาค

พารามิเตอร์	ความดันลด	ประสิทธิภาพ
เพิ่มขนาดของไซโคลอน	ลดลง	ลดลง
เพิ่มความยาวในส่วนของทรงกระบอกและส่วนกรวย	ลดลงเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น
เพิ่มขนาดของท่ออากาศออก	ลดลง	ลดลง
เพิ่มพื้นที่ท่ออากาศเข้า	เพิ่มขึ้น	ลดลง
เพิ่มความเร็ว	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
เพิ่มอุณหภูมิ	ลดลง	ลดลง
ความเข้มข้นของฝุ่นมากขึ้น	ยิ่งลดลง	เพิ่มขึ้น
เพิ่มขนาด และ/หรือ ความหนาแน่นของอนุภาค	ไม่มีผล	เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพไซโคลอน

พารามิเตอร์	กำหนด	ประสิทธิภาพ
ความดันตกคร่อม (Pressure Drop)	ลดลง	ลดลง
อัตราการไหล	ลดลง	ลดลง
ขนาดอนุภาค	ลดลง	ลดลง
ความหนืด (Viscosity)	ลดลง	เพิ่มขึ้น
เส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลอน	ลดลง	เพิ่มขึ้น
ความยาวของท่อทางออก (Vortex Finder Length)	ลดลง	เพิ่มขึ้น

ค่าความดันลด (Pressure Drop) เป็นค่าที่บอกถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการคัดแยกอนุภาคในไซโคลอน ค่าความดันลด ( $\Delta P$ ) หาได้จากสมการ Shepherd และ Lapple (1939) ดังนี้

$$\Delta P(\text{cm.wg}) = 5.12 P_{10} V^2 N_H \quad (3.15)$$

$$N_H = \frac{16 H_c B_c}{D_c^2} \quad (3.16)$$

โดยค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ของไซโคลอนที่รับได้ตอนเดินเครื่องมักน้อยกว่า 20 cm.wg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ความดันตกคร่อม (Pressure Loss) ในโซโคลน อาจเกิดได้จากอิทธิพลต่างๆดังนี้**

1. เกิดจากการขยายตัวหรืออัดตัวของแก๊สขณะผ่านเข้าสู่โซโคลน
2. ความเสียดทานที่ผนังของโซโคลน
3. การหมุนที่ทำให้เกิดกระแสหมุนวน (Vortex) ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ (Kinetic Energy of Rotation)
4. การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อทางออกของแก๊ส
5. การสูญเสียเนื่องจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดขณะที่แก๊สผ่านท่อทางออก
6. การสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานของการหมุน (Rotation Energy) เป็นพลังงานความดัน (Pressure Energy) ในท่อทางออก

**ตารางที่ 3.5 ข้อดีและข้อด้อยของโซโคลน**

<b>ข้อดี</b>	ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิต, ติดตั้งและซ่อมแซมไม่สูง เคลื่อนที่อุปกรณ์ได้ง่ายขึ้น และต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย
<b>ข้อด้อย</b>	ในการคัดแยกอนุภาคให้มีประสิทธิภาพดีจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมสูง

**3.3 แบบจำลองการไหลเชิงคณิตศาสตร์และวิธีการสร้างแบบจำลองการไหล**

**3.3.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equation) [2]**

ซึ่งในความจริงแล้วมวลไม่สามารถเพิ่มหรือหายไปจากระบบที่ต้องการได้ ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุรักษ์มวลคือ การพิจารณาถึงสมดุลมวลของชิ้นส่วนของไหลดังนี้  
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหลคือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \tag{3.17}$$

การหาอัตราการไหลเชิงมวลผ่านพื้นผิวและชิ้นส่วนย่อยเท่ากับผลคูณของความหนาแน่น, พื้นที่และความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 3.6 จะพบว่าอัตราการไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \tag{3.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

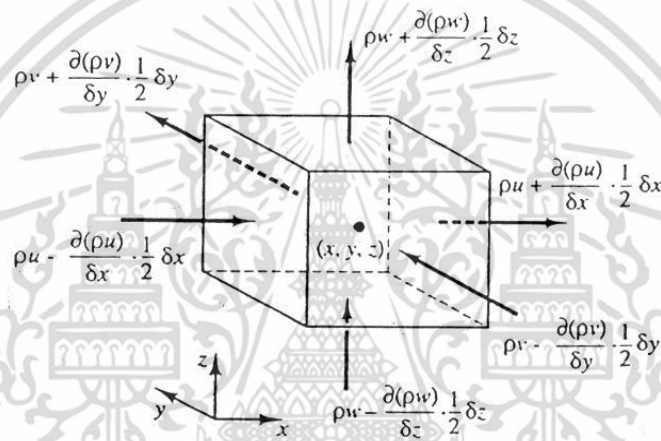
โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อย

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยเท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อย้ายข้างให้อยู่ในฝั่งเดียวกันเมื่อรวมผลลัพธ์จะหักล้างกันหมด เทอมทั้งหมดได้ถูกเรียบเรียงทางซ้ายของสมการและถูกหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย  $\delta x \delta y \delta z$  ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.19)$$

หรือในรูปแบบของเวกเตอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.6 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล [14]

สมการ 3.17 คือสมการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัวและอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็กๆ จะถูกเรียกเป็นเทอมของการพาสำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (เช่น ของเหลว) ความหนาแน่นมีค่าคงที่และสมการ 3.15 จะกลายเป็น

$$\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (3.21)$$

หรือในรูปแบบเต็ม

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.22)$$

### 3.3.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหลในเทอมชิ้นส่วนย่อยของไหล

กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหล คุณสมบัติแต่ละอย่างของอนุภาคจะเป็นฟังก์ชันตำแหน่ง  $(x, y, z)$  ของอนุภาคและเวลา  $(t)$  ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษานี้จะกำหนดให้ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล ด้วยสัญลักษณ์  $\phi$  โดยการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  เทียบกับเวลาของอนุภาคของไหล  $\left(\frac{D\phi}{Dt}\right)$  คือ

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad (3.23)$$

และโดยที่  $dx/dt = u$ ,  $dy/dt = v$  และ  $dz/dt = w$  หากแทนค่าดังกล่าวไปในสมการ 3.23 จะได้ว่า

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \quad (3.24)$$

$D\phi/Dt$  เป็นนิยามของอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ  $\phi$  ต่อหน่วยมวล ในกรณีของสมการอนุกรมมวล จะพัฒนาสมการสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ  $\phi$  สามารถถูกแปลงให้เป็นคุณสมบัติเชิงปริมาตรได้โดยการคูณความหนาแน่น  $\rho$  กับเทอม  $D\phi/Dt$  ดังนั้น

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right) \quad (3.25)$$

รูปแบบนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล ในปริมาตรเล็กๆ ที่หยุดนิ่ง เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่าง อนุพันธ์คุณสมบัติ  $\phi$  ของอนุภาคของไหล กับ อัตราเปลี่ยนของ  $\phi$  ในชิ้นส่วน หรือปริมาตรย่อยๆ ของของไหล การพิจารณาอนุกรมมวล ค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร (ในที่นี้คือ ความหนาแน่น  $\rho$ ) คือพารามิเตอร์ที่ต้องศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในปริมาตรเล็กๆ และผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุกรมมวล (สมการ 3.20) คือ

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) = 0$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของทั้งสองเทอมนี้สำหรับคุณสมบัติใดๆ ของของไหล  $\phi$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) \quad (3.26)$$

สมการ 3.21 เทอมแรกคืออัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ  $\phi$  ต่อหน่วยปริมาตร บวกกับเทอมที่สองคือการไหลสุทธิของ  $\phi$  ต่อปริมาตร ที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของของไหล ซึ่งสามารถนำมาเขียนใหม่เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ในอนุภาคของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \rho \left[ \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right] + \phi \left[ \frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right] = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอม  $\phi \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) \right]$  เท่ากับศูนย์เนื่องจากสมการอนุรักษ์มวล (สมการ 3.20)

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทาง อ้างอิงแกนในพิกัดฉาก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นปริมาณสเกลลาร์ สามารถแทนพารามิเตอร์  $\phi$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร ตามที่นิยามไว้ในสมการ 3.25 และ 3.27 แสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน

x-momentum	u	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u})$
y-momentum	v	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u})$
z-momentum	w	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u})$
Energy	E	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E \mathbf{u})$

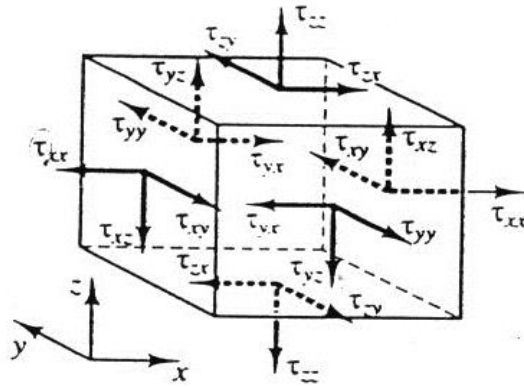
รูปแบบที่แสดงในตารางที่ 3.6 จะถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดจากนี้

### 3.3.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ [2]

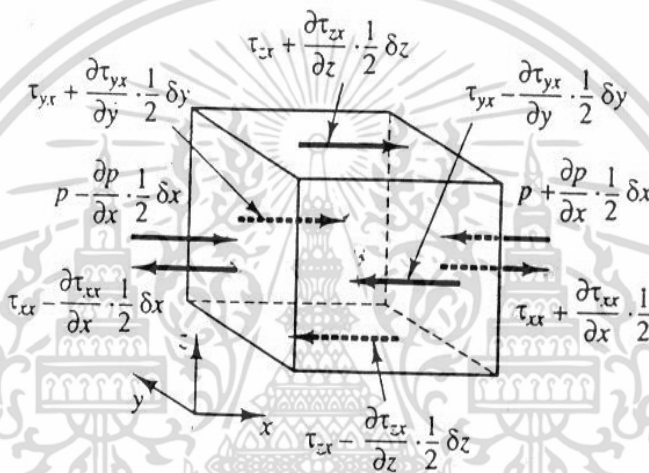
กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาค, อัตราการเพิ่มโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลรวมแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล อัตราการเพิ่มโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลในทิศ x, y และ z กำหนดได้โดย

$$\rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt}, \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3.28)$$

การพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง x เนื่องจากความดันและความเค้นย่อย  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  และ  $\tau_{xz}$  ดังในรูปที่ 3.8 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ซึ่งมีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิงโดยมีเครื่องหมายบวก และมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้ามกับแรงสุทธิในทิศทาง x ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของไหลในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 3.7 องค์ประกอบความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล [14]



รูปที่ 3.8 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x [14]

เมื่อพิจารณาผิวหน้าที่ E, W จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \left[ \left( p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( \tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[ - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \delta x \right) + \left( \tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & = \left( - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \end{aligned} \quad (3.29 ก.)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า N, S จะได้ว่า

$$- \left( \tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left( \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (3.29 ข.)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า T, B ได้ว่า

$$- \left( \tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left( \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (3.29 ค.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวหน้าจะเท่ากับผลรวมของ (3.29 ก.), (3.29 ข.) และ (3.29 ค.) หาด้วยปริมาตรสุทธิ

$$\frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.30)$$

เทอมที่ปรากฏในสมการ 3.30 ยังไม่รวมการพิจารณาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนของของไหล ซึ่งสามารถรวมได้โดยการพิจารณาเป็นแหล่งสร้างหรือสูญเสียโมเมนตัมในทิศทาง  $x$

ขั้นตอนนี้สมการโมเมนตัมในทิศทาง  $x$  หาได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในทิศทาง  $x$  และ อนุภาคการไหล (สมการ 3.28) เท่ากับผลรวมของแรงในทิศทาง  $x$  ที่กระทำต่อชิ้นส่วนของไหลด้วยความเค้นที่ผิวบวกกับอัตราการสร้างหรือสูญเสียของโมเมนตัมในทิศทาง  $x$  เนื่องจากแรงภายในชิ้นส่วนของไหลตามแนวแกนเท่ากับ

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3.31 ก.)$$

ในทำนองเดียวกันโมเมนตัมในทิศทาง  $y$  จะได้ว่า

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3.31 ข.)$$

และโมเมนตัมในทิศทาง  $z$  คือ

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (3.31 ค.)$$

ความดันมีลักษณะเป็นความเค้นอัดตั้งฉาก (Compressive normal stress) โดยทั่วไปมีเครื่องหมายเป็นลบ ในขณะที่ความเค้นตั้งฉากเนื่องจากความหนืดมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (Tensile normal Stress) จะมีเครื่องหมายบวก เทอมของการสร้างหรือสูญเสียของโมเมนตัม  $S_{Mx} = 0$ ,  $S_{My} = 0$  และ  $S_{Mz}$  (สมการ 3.26 a-c) คือแรงกระทำภายในของแต่ละทิศทาง ตัวอย่างเช่นแรงกระทำภายในเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะถูกกำหนดให้มีค่า  $S_{Mx} = 0$ ,  $S_{My} = 0$  และ  $S_{Mz} = -\rho g$

### 3.3.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ [2]

สมการพลังงานหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับอัตราการป้อนความร้อนให้แก่อนุภาคบวกกับอัตราการทำงานสู่อุณหภูมิของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตร คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (3.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดงานบนพื้นผิวของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลคูณของแรงและความเร็วในทิศทางของแรง สำหรับแรงตามที่แสดงในสมการ 3.29 ก-ค เฉพาะที่กระทำในทิศทาง  $x$  จะเกิดงานเท่ากับ

$$\begin{aligned} & \left[ \left( pu - \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( \tau_{xx}u - \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( pu + \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left( \tau_{xx}u + \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & + \left[ - \left( \tau_{yx}u - \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) + \left( \tau_{yx}u + \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \right] \delta x \delta z \\ & + \left[ - \left( \tau_{zx}u - \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) + \left( \tau_{zx}u + \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \right] \delta x \delta y \end{aligned}$$

เมื่อลดรูปสมการแล้ว อัตราการเกิดงานสุทธิบนพื้นผิวเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแรงในทิศทาง  $x$  คือ

$$\left[ \frac{\partial[u(-p + \tau_{xx})]}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.33 ก.)$$

ส่วนประกอบย่อยของแรงเนื่องจากความเค้นพื้นผิวในทิศทาง  $y$  และ  $z$  จะทำงานบนอนุภาคดังกล่าวเช่นกัน กระบวนการคิดแบบข้างต้นอัตราการเกิดงานบนอนุภาคของไหลเนื่องจากการทำงานด้วยแรงเหล่านี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\left[ \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial[v(-p + \tau_{yy})]}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.33 ข.)$$

และ

$$\left[ \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial[w(-p + \tau_{zz})]}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.33 ค.)$$

อัตราการเกิดงานทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตรของของไหลโดยแรงบนพื้นผิวทั้งหมด คือผลรวมของ สมการ 3.33 ก-ค. หากด้วยปริมาตร  $\delta x \delta y \delta z$  เทอมของ  $p$  สามารถจัดรวบรวมและเขียนในรูปแบบของไดเวอร์เจนต์ดังนี้

$$-\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} = -\text{div}(pu)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอัตราการเกิดงานรวมทั้งหมดบนชิ้นส่วนของของไหลโดยความเค้นบนพื้นผิว มีหน่วยเป็น ปริมาณของพลังงานต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยปริมาตร

$$[-div(p\mathbf{u})] + \left[ \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] \quad (3.34)$$

### 3.3.5 แบบจำลองความเครียดเรย์โนลด์ส Reynolds Stress Model (RSM)

แบบจำลองความปั่นป่วนความเครียดเรย์โนลด์สมีความซับซ้อน แต่กล่าวได้ว่าเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดที่ใช้อธิบายสมบัติของการไหล แบบจำลองนี้มีการคำนวณทั้งหมด 7 สมการเชิงอนุพันธ์ แบ่งเป็น 6 สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ของแต่ละความเครียดเรย์โนลด์ส ( $\overline{u_x'^2}, \overline{u_y'^2}, \overline{u_z'^2}, \overline{u_x' u_y'}, \overline{u_y' u_z'}, \overline{u_x' u_z'}$  และ  $\overline{u_x' u_x'}$ ) และสมการเชิงอนุพันธ์ของการกระจายตัวของพลังงาน (Energy Dissipation) อีกหนึ่งสมการ

แบบจำลองความเครียดเรย์โนลด์สมีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด  $k-\varepsilon$  และแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด  $RNG-k-\varepsilon$  ค่าต่าง ๆ ในเทอมของความเครียดเรย์โนลด์ส หาจากโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential) รายละเอียดของสมการแสดงดังสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned} & C_{ij} = \text{Convection} \\ & \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u'_k u'_i u'_j})}_{\text{Local time derivative}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} \overline{u'_i} + \delta_{ik} \overline{u'_j})]}_{D_{T,ij} = \text{Turbulent Diffusion}} \\ & + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ u \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{D_{i,j} = \text{Molecular Diffusion}} - \underbrace{\rho \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right)}_{P_{ij} = \text{Stress production}} - \underbrace{\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta})}_{G_{ij} = \text{Buoyancy production}} \\ & + \underbrace{p \left( \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i} \right)}_{\emptyset = \text{Pressure Strain}} - \underbrace{2\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}}_{\varepsilon_{ij} = \text{Dissipation Rate}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-2\rho\Omega_k(\overline{u'_j u'_m \varepsilon_{ikm}} + \overline{u'_i u'_m \varepsilon_{jkm}}) + s_{user}$$

$F_{ij} = \text{Production by system rotation} \quad \text{Source Term}$

เทอมของ  $C_{ij}, D_{L,ij}, P_{ij}$  และ  $F_{ij}$  ไม่จำเป็นในแบบจำลอง สำหรับ  $D_{T,ij}, G_{ij}, \phi_{ij}$  และ  $\varepsilon_{ij}$  อธิบายดังแสดงต่อไป

การถ่ายโอนแบบปั่นป่วนโดยการแพร่ (Turbulent Diffusive Transport  $D_{T,ij}$ ) แสดงดังสมการที่ (3.35) ความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent Viscosity  $\mu_t$ ) คำนวณจาก  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  และ  $\sigma_k$  มีค่าเท่ากับ 0.82 แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด  $k-\varepsilon$  ใช้ค่า  $\sigma_k$  เท่ากับ 1

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (3.35)$$

แบบจำลอง Pressure Strain ( $\phi_{ij}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.36 ให้  $\phi_{ij,1}$  คือเทอมของ Pressure Strain แบบช้า  $\phi_{ij,2}$  คือเทอมของ Pressure Strain แบบเร็ว และ  $\phi_{ij,\omega}$  คือเทอมการสะท้อนของผนัง (Wall reflection) ซึ่งรูปแบบทั้งหมดแสดงดังด้านล่าง

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} + \phi_{ij,\omega} \quad (3.36)$$

$$\phi_{ij,1} = -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left[ \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \quad (3.37)$$

$$\phi_{ij,2} = -C_2 \left[ (P_{ij} + F_{ij} + G_{ij} - C_{ij}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (P + G + C) \right] \quad (3.38)$$

เมื่อ  $C_1 = 1.8, C_2 = 0.6, P_{ij}, F_{ij}, G_{ij}$  และ  $C_{ij}$  แสดงดังสมการที่ 4.4.13 ดังนี้

$$P = \frac{1}{2} P_{kk}, G = \frac{1}{2} G_{kk}, C = \frac{1}{2} C_{kk}$$

ในเทอมสะท้อนของผนัง ( $\phi_{ij,\omega}$ ) คือการกระจายของ Normal Stress ที่บริเวณใกล้ผนัง โดยเทอมนี้คือรูปแบบของสมการ 3.36 โดย  $C'_1 = 0.5, C'_2 = 0.3, n_k$  คือหน่วยปกติที่ผนัง,  $d$  คือ ระยะห่าง

ถึงผนัง และ  $C_l = \frac{C_\mu^{3/4}}{k}$  ในขณะที่  $C_\mu = 0.09$  และ  $k = 0.4187$

$$\begin{aligned} \phi_{ij,\omega} = & -C'_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u'_k u'_m n_k n_m} \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_k u'_m n_j n_k} - \frac{3}{2} \overline{u'_j u'_k n_i n_k} \right) \frac{k^{3/2}}{C_l \varepsilon d} \\ & + C'_2 \left( \phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \phi_{ik,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \phi_{jk,2} n_i n_k \right) \frac{k^{3/2}}{C_l \varepsilon d} \end{aligned} \quad (3.39)$$

ในเทอมของ Buoyancy ( $G_{ij}$ ) แสดงดังสมการ 4.1.19 และใช้ 0.85 เป็นค่าเริ่มต้นของ  $Pr_t$  ซึ่ง

เป็นเลขความปั่นป่วนสำหรับพลังงาน (Prandtl number)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{ij} = -\frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \left[ g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right] \quad (3.40)$$

ค่าเทนเซอร์ของอัตราการกระจาย (Tensor Dissipation Rate ;  $\varepsilon_{ij}$ ) แสดงดังสมการ (3.41)

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( \rho \varepsilon + 2\rho \varepsilon \frac{k}{a^2} \right) \quad (3.41)$$

เมื่อ  $a$  คือความเร็วเสียง โดยอัตราการกระจาย ( $\varepsilon$ ) จะคำนวณด้วยสมการ เหมือนกับที่ใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด  $k - \varepsilon$

โดยจะอธิบายการประเมินของแบบจำลอง Reynolds Stress ไว้ดังตารางที่ 3.7

ตาราง 3.7 การประเมินแบบจำลอง RSM (Reynolds Stress Model)

ข้อดี	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เป็นแบบจำลองที่ศักยภาพครอบคลุมรูปแบบการไหลมากที่สุดอันหนึ่ง</li> <li>2. การคำนวณต้องการเพียงแค่เงื่อนไขค่าของและ/หรือเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เท่านั้น</li> <li>3. มีความแม่นยำสูงในการคำนวณคุณสมบัติของการไหลรวมทั้ง ค่าของ Reynolds Stresses ทั้งการไหลอย่างง่ายและการไหลที่ซับซ้อน อาทิเช่น การไหลของลำเจ็ต ช่องการไหลที่ไม่สมมาตรต่างๆ และการไหลในท่อหน้าตัดที่ไม่เป็นรูปร่างวงกลมต่างๆรวมทั้งการไหลในท่อโค้ง</li> </ol>
ข้อเสีย	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ใช้ทรัพยากรการคำนวณอย่างมาก</li> <li>2. ยังไม่ได้รับการตรวจสอบกับการทดลองมากเท่าแบบจำลอง <math>k-\varepsilon</math></li> </ol>

### 3.3.6 กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation Consistent)

วิธีการ SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) จะใช้ขั้นตอนการเดาและการแก้ไขค่าในการคำนวณหาค่าความดันในระบบพิกัดแบบ Staggered grid จะมีการแสดงตัวอย่างให้เห็น โดยพิจารณาสมการการไหลแบบคงตัวและราบเรียบ 2 มิติ ในพิกัดคาร์ทีเซียน กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้นเริ่มต้นจากการเดาค่าสนามความดัน  $p$  ตลอดทั้งโดเมนการไหลจากนั้นเราจะทำการหาคำตอบของสมการแปลงรูปโมเมนตัม

$$a_{i,j} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.42)$$

โดยใช้ความดันที่เดาขึ้นในครั้งแรก เพื่อให้ได้ค่าความเร็ว  $u^*$  และ  $v^*$  จากสมการ 3.43

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{I-1,j}^* - p_{I,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น เราทำการนิยามค่าแก้ของความดัน  $p'$  ขึ้น ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าความดันที่ถูกต้องกับค่าความดันที่เดาขึ้น

$$p = p^* + p' \quad (3.44)$$

แต่จะมีความแตกต่างของการจัดการสมการโมเมนตัมตรงที่ว่าในสมการค่าแก้ความเร็วของวิธี SIMPEC จะไม่ตัดเทอมที่มีนัยสำคัญออกเช่นที่ทำในวิธี SIMPLE

สมการการแก้ค่าความเร็วสำหรับวิธี SIMPEC หาได้โดย

$$u'_{i,j} = d_{i,j} (p'_{I-1,j} - p'_{I,j}) \quad (3.45)$$

เมื่อ

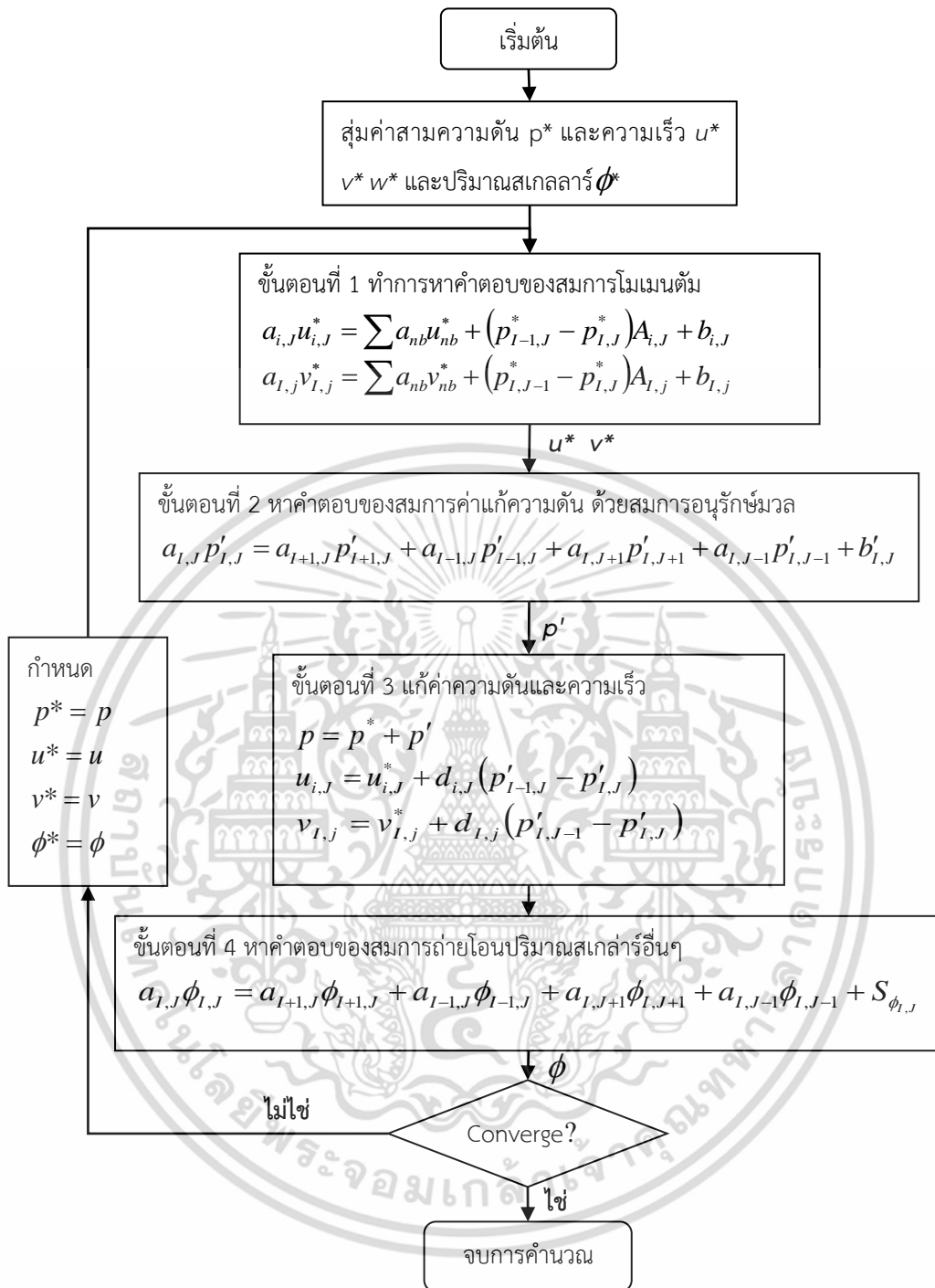
$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j} - \sum a_{nb}} \quad (3.46)$$

ในทำนองเดียวกันสมการแก้ความเร็ว ที่ปรับปรุงแล้วคือ

$$v'_{I,j} = d_{I,j} (p'_{I,j-1} - p'_{I,j}) \quad (3.47)$$

$$d_{I,j} = \frac{A_{I,j}}{a_{I,j} - \sum a_{nb}} \quad (3.48)$$

สมการความต่อเนื่องที่แปลงรูปแล้ว อันปรากฏเทอมของความดันนั้น จะมีรูปแบบเหมือนกับในวิธี SIMPLE ยกเว้นเทอม  $d$  ซึ่งถูกคำนวณจากสมการ 3.46 และ 3.48 ลำดับของการดำเนินการที่สมบูรณ์ของวิธีการ SIMPEC นั้นให้คำตอบในการหาค่าความดัน และความเร็ว โดยกระบวนการวิธีทำซ้ำดังนั้นหากมีปริมาณสเกลลาร์อื่นใดที่ผูกติดอยู่กับสมการโมเมนตัม ก็จำเป็นต้องทำการคำนวณเป็นลำดับ และวนกลับมาทำการคำนวณซ้ำอีก จนกระทั่งคำตอบทั้งหมดลู่เข้า ซึ่งได้ให้ Flow chart ไว้ในรูป 3.9 โดยตัวอย่างของการไหลในสองมิติ



รูปที่ 3.9 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLEX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 Discrete Phase Modeling (DPM)

#### สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Governing Equation of Particle Motion)

สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้มาจากการอินทิเกรตของสมการแรงที่กระทำกับอนุภาคซึ่งอยู่ในรูปของ Lagrangian การสมมูลแรงนี้ได้พิจารณาจากเทอมทางซ้ายมือกับเทอมต่างๆของแรงที่กระทำกับอนุภาคสามารถเขียนได้ดังนี้ โดย The major simplifying assumption are follow

อัตราส่วนของอนุภาคต่อความหนาแน่นของของไหลมีค่าที่กว้างมาก : ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลที่เป็นอากาศ

- แรงต้านอากาศ (Drag Force) เป็นแรงที่กระทำได้เด่นชัด : คือผลโดยตรงของสมมุติฐานก่อนหน้านี้ เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของของเหลว และมีอีกหลายแรงที่กระทำ เช่น Lift Force, Basset Force และ Buoyancy force ซึ่งอาจจะไม่นำมาพิจารณาซึ่งมีผลกระทบเล็กน้อยต่ออนุภาค

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{gx(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.49)$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24} \quad (3.50)$$

สำหรับในสมการ (3.50) แสดงการคำนวณหาประสิทธิภาพแรงต้านอากาศ (Drag Coefficient) เมื่อ  $a_1, a_2$  และ  $a_3$  คือค่าคงที่ของสมการใช้สำหรับอนุภาคทรงกลมที่นำเสนอโดย Morsi and Alexander

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + b_1 \text{Re}^{b_2}) + \frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}} \quad (3.51)$$

สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่าไมครอน  $F_D$  สามารถหาได้จากสมการ (3.52)

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (3.52)$$

โดยที่  $C_c$  คือ แฟคเตอร์ปรับค่าของคันทันนิ่งแฮม (Cunningham) ในกฎของสโตกส์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.275 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (3.53)$$

เมื่อ  $\lambda$  เป็นค่าเฉลี่ยโมเลกุลของเส้นทางอิสระ (Molecular mean free path)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Forcing Reference frames คือ แรงที่เพิ่มมาในเทอมของ  $f_x$  ในสมการที่ (3.54)

$$\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) \Omega^2 y - 2\Omega \left(u_{x,p} - \frac{\rho}{\rho_p} u_x\right) \quad (3.54)$$

ที่  $u_{y,p}$  และ  $u_y$  คือ อนุภาคและความเร็วของไหลในคาร์ทีเซียนทิศทาง  $y$  และ

$$\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) \Omega^2 y - 2\Omega \left(u_{z,p} - \frac{\rho}{\rho_p} u_z\right) \quad (3.55)$$

ที่  $u_{x,p}$  และ  $u_x$  คือ อนุภาคและความเร็วของไหลในคาร์ทีเซียนทิศทาง  $x$  Brownian Force สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่าไมครอน โดยอิทธิพลของการเคลื่อนที่แบบ Brownian สามารถเพิ่มเข้าไปเป็นทางเลือกในเทอมของแรง ส่วนประกอบของ Brownian Force คือรูปแบบ Gaussian white noise process กับ ความเข้มข้นของสเปกตรัม แสดงโดย

$$S_{n,ij} = S_0 \delta_{ij} \quad (3.56)$$

ที่  $S_{n,ij}$  คือ Kronecker delta function และ

$$S_0 = \frac{216\nu k_B T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c} \quad (3.57)$$

$T$  คือ ค่าสัมบูรณ์อุณหภูมิของของไหล,  $\nu$  คือ ความหนืดเชิงจลน์ และ  $k_B$  คือค่าคงที่ Boltzmann Amplitude ของส่วนประกอบของแรง Brownian ถูกประเมินที่ทุกๆช่วงเวลา สมการพลังงานต้องใช้ได้สำหรับแรงของ Brownian ที่ทำให้เกิดผลกระทบ โดยแรงของ Brownian มีสำหรับรูปแบบที่ไม่ปั่นป่วนเท่านั้น

Saffman's Lift force หรือแรงยกของอากาศเนื่องจากการเฉือน สามารถเป็นทางเลือกในเทอมของแรงที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แรงยกของอากาศที่ใช้คือ Li และ Ahmadi ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในส่วนของพจน์ที่แสดงไว้

$$\vec{F} = \frac{2K\nu^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik} d_{kl})^{1/4}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (3.58)$$

ที่  $k = 2.594$  และ  $d_{ij}$  คือ การเสียรูปของเทนเซอร์ โดยรูปแบบของแรงยกนี้มีไว้สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ทั้งนี้ Particle Reynolds Number อ้างอิงจากความเร็วของของไหลที่มีอนุภาคจะมีค่าน้อยกว่ารากที่สองของ Particle Reynolds Number โดยอ้างอิงจากสนามของแรงเฉือน ข้อจำกัดคือจะสามารถใช้ได้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน เหมาะสมกับตัวเลือกที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่าไมครอน

The Discrete Random Walk Model คือ รูปแบบของ eddy lifetime โดยปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคที่มีต่อเนื่องของเฟสของไหลที่ไม่ต่อเนื่องโดยการจำลอง แต่ละ eddy จะมีลักษณะโดย

- Gaussian กระจายการสุ่มของความเร็วแบบผันแปร  $u', v'$  และ  $w'$
- ช่วงระยะเวลา,  $T_e$

ค่าของ  $u', v'$  และ  $w'$  โดยภายใต้เงื่อนไขความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของ Gaussian ดังนั้น

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (3.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $\zeta$  จำนวนการสุ่มที่กระจายตัว โดยที่ค่าทางฝั่งขวามือจะเป็นค่าของ RMS ของความเร็วที่ผันแปร เมื่อทราบพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนที่แต่ละจุดในการไหล โดยจะส่วนประกอบของค่า RMS จะสามารถกำหนดเป็น (สมมติฐานคือ Isotropy)

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (3.60)$$

สำหรับรูปแบบ  $k-\varepsilon$  และรูปแบบ  $k-\omega$  เมื่อใช้ RMS, Non-Isotropy นั้นถูกรวมมาจากความเร็วผันแปร

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (3.61)$$

$$v' = \zeta \sqrt{v'^2} \quad (3.62)$$

$$w' = \zeta \sqrt{w'^2} \quad (3.63)$$

เมื่อพิจารณาอ้างอิงในวินาทีของความปั่นป่วนเป็นเส้นทแยงมุม สำหรับแบบจำลอง LES ความผันแปรของความเร็วเท่ากันในทุกทิศทาง ลักษณะ lifetime ของ Eddy แสดงดัง

$$T_e = 2T_L \quad (3.64)$$

เมื่อ  $T_L$  แสดงดังสมการ 3.64 ในรูปทั่วไป หรือเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

$$T_e = -T_L \log(r) \quad (3.65)$$

เมื่อ  $r$  อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และ  $T_L$  แสดงดังสมการ 3.65 จะทำให้  $T_e$  มีค่าใกล้เคียงกับ correlation function Particle eddy crossing time แสดงดังสมการ

$$t_{cross} = -\tau \ln \left[ 1 - \left( \frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right] \quad (3.66)$$

ที่  $\tau$  คือ particle relaxation,  $L_e$  คือความยาวของ Eddy และ  $|u - u_p|$  คือ ขนาดความสัมพัทธ์ของความเร็ว

### 3.5 รูปแบบการจำลองอนุภาค (Modeling the particle phase)

แบบจำลองคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของการไหลสองเฟส (Two-Phase Flow) มี 2 วิธีที่นิยมใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย คือ วิธีของออยเลอร์ (Eulerian Continuum Approach) และ วิธีของลากรางจ์ (Lagrangian Trajectory Approach)

#### 3.5.1 Eulerian Continuum Approach

ในระเบียบวิธีของออยเลอร์ อนุภาคจะถือว่าเป็นของเหลวตัวที่สองที่มีพฤติกรรมเหมือนความต่อเนื่องและสมการได้พัฒนาเพื่อหาคุณสมบัติโดยเฉลี่ยของอนุภาค กล่าวคือความเร็วของอนุภาคคือความเร็วเฉลี่ยเทียบกับปริมาตรเฉลี่ย โดยวิธีนี้มีความเหมาะสมที่สุด เมื่อต้องอธิบายคุณสมบัติสถานะการกระจายตัว เช่น ความดัน, ฟลักซ์เชิงมวล (Mass Flux), ความเข้มข้น, ความเร็วและอุณหภูมิ ซึ่งระเบียบวิธีของออยเลอร์ มีความเหมาะสมสำหรับการจำลองกระบวนการไหลของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ทั้งนี้ก็ต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองที่มีความซับซ้อนเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่ปรากฏในกระบวนการอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 Lagrangian Trajectories Approach

ในระเบียบวิธีของลากรางจ์ถูกนำมาใช้เมื่อเฟสของอนุภาคมีความเบาบาง เพื่ออธิบายพฤติกรรมของอนุภาคที่ไม่มีความต่อเนื่อง การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะแสดงด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ของออยเลอร์ และใช้การอินทิเกรตสมการเพื่อแยกแต่ละอนุภาค ในการแก้สมการลากรางจ์เพื่อหาการเคลื่อนที่ของอนุภาค การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของแก๊ส (โดยทั่วไปหาได้โดยระเบียบวิธี Eulerian ) และอนุภาคอื่นๆ ที่อยู่รอบอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่นี้ควรมีการกำหนดไว้ล่วงหน้า ความเร็วของอนุภาคและเส้นทางอนุภาคที่ได้จากการคำนวณสำหรับแต่ละอนุภาค วิธีนี้มีความเหมาะสมมากกว่าเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะของการเคลื่อนที่ของอนุภาค แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ค่าเฉลี่ยทางสถิติที่ถูกต้องเหมาะสมโดยจะต้องมีการติดตามอนุภาคจำนวนมาก ข้อดีของการใช้ระเบียบวิธีออยเลอร์คือ สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของแต่ละอนุภาค เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาแน่น และอื่นๆ นอกจากนั้นจะสามารถทราบปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการไหลของอนุภาคได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้รูปแบบลากรางจ์ สามารถใช้สำหรับทดสอบ ตรวจสอบ รวมถึงพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ได้ด้วย

โดยระเบียบวิธีของลากรางจ์จะจำแนกออกได้ 2 ประเภท คือ Deterministic Trajectory Methods และ Stochastic Trajectory Method แบ่งตามผลกระทบของความปั่นป่วน วิธี Deterministic ทุกกระบวนการของการถ่ายโอนแบบปั่นป่วนของอนุภาคจะไม่ถูกนำมาพิจารณา วิธี Stochastic จะคำนึงถึงผลกระทบของการไหลแบบปั่นป่วนที่ส่งผลต่ออนุภาค โดยพิจารณาความเร็วของของไหลในสูตรสมการของการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระเบียบวิธีของ Stochastic Lagrangian

### 3.5.3 ระเบียบวิธีแบบ Stochastic Trajectory

สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ในรูปแบบทั่วไปตามรูปแบบด้านล่างนี้

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (3.67)$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{T_p} (u - u_p) + g \quad (3.68)$$

ความเร็วของของไหล  $u$  ในสมการข้างล่างที่แสดงการรวมของค่าเฉลี่ยและความเร็วผันแปร

$$u = U + u' \quad (3.69)$$

โดยสมมติ Isotropic Turbulence โดยให้

$$\overline{u'^2} = \overline{u'^2} = \overline{w'^2} = \frac{2}{3} k \quad (3.70)$$

เมื่อ  $k$  คือ Turbulence Kinetic Energy นอกจากนี้สันนิษฐานได้ว่าความเร็วที่ผันแปรของของไหลนั้นอยู่ภายใต้ความน่าจะเป็นของการกระจายของความหนาแน่นในรูปแบบ Gaussian โดยส่วนใหญ่ของรูปแบบ Stochastic ในความเป็นจริงมันถูกพัฒนามาจากสูตรของ Gosman และ Ioannides ซึ่งแสดงดังสมการด้านล่าง

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3} k} * \zeta \quad (3.71)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $c_t$  คือ จำนวนการสุมที่ตึงมากจากความน่าจะเป็นของค่าการกระจายตัวโดยมีค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นศูนย์ จำนวนในการสุมที่น้อยที่สุดโดยจะดำเนินการในรูปแบบของ Park และ Miller โดยการเลือกความผันแปรอ้างอิงมาจากการหมุนของ Turbulence Eddy ที่ทราบขนาดและช่วงเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำหรับ Eddy ดังสมการข้างล่างนี้

$$t_e = c_t \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.72)$$

$$l_e = t_e \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (3.73)$$

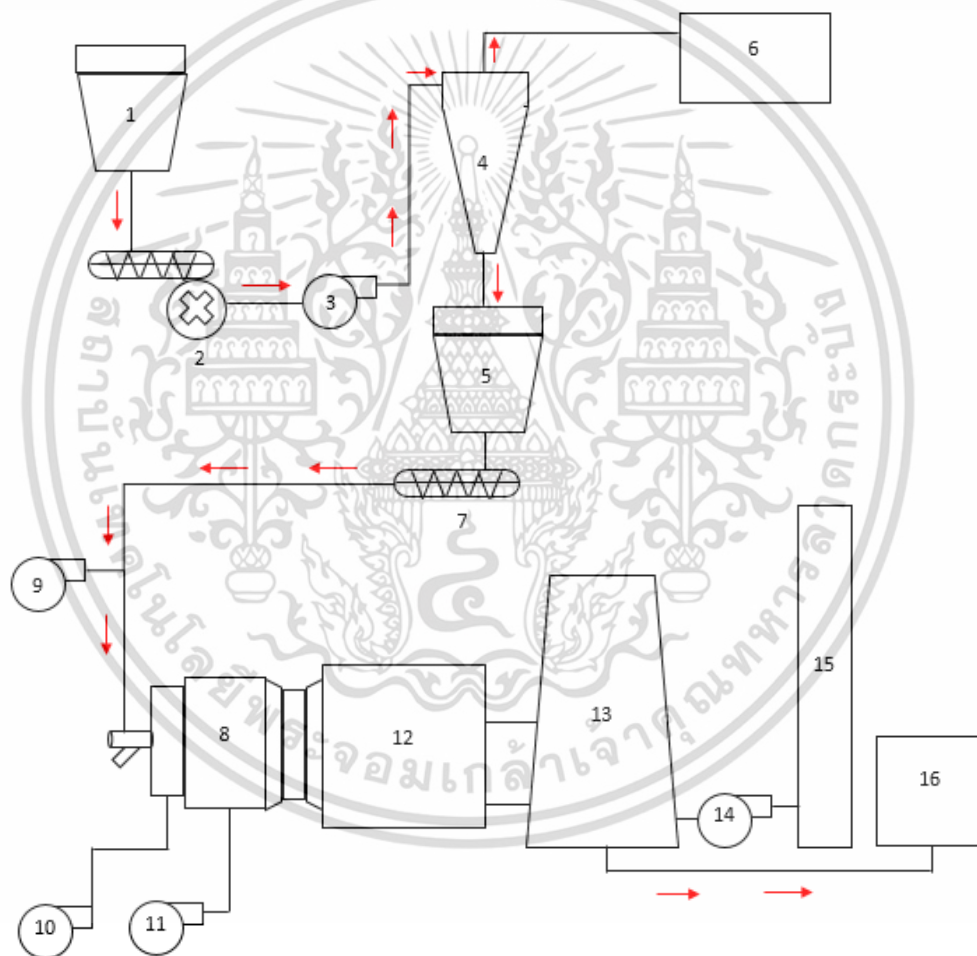


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

### 4.1 อุปกรณ์การทดลองของระบบทั้งหมด

ในหัวข้อนี้จะแสดงแผนภาพอุปกรณ์ชุดทดลองทั้งหมดดังรูปที่ 4.1 ชีวมวลอัดแท่งจะถูกเก็บในถังพัก (หมายเลข 1) เมื่อทำการทดลองชีวมวลอัดแท่งในถังพักจะถูกลำเลียงด้วยสกรูเข้าสู่เครื่องบด (หมายเลข 2) เพื่อทำการบดด้วยตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร และใช้เครื่องดูดอากาศ(หมายเลข 3) ในการลำเลียงดูดชีวมวลผงน้ำหนัก 1 กิโลกรัมเข้าสู่ไซโคลน (หมายเลข 4) ด้วยความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.1 แผนภาพอุปกรณ์ชุดทดลองทั้งหมด (1) ถังเก็บชีวมวลอัดแท่ง, (2) ระบบบดเชื้อเพลิงชีวมวล (3) พัดลมดูดอากาศ, (4) ไซโคลน, (5) ถังเก็บชีวมวลผง, (6) ถุกรองอากาศ (Filter)

#### 4.1.1 ถังเก็บชีวมวลอัดแท่ง (หมายเลข 1)

ในระบบนี้จะใช้ Hopper (ดังรูปที่ 4.2) เป็นตัวเก็บสะสมชีวมวลอัดเม็ดมีความจุประมาณ 0.5 ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่เดียวกันสามารถส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ถังเก็บชีวมวลผงอัดแท่ง

#### 4.1.2 เครื่องบด (หมายเลข 2)

เครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง (ดังรูปที่ 4.3) มีลักษณะหัวบดเป็นหัวค้อนติดอยู่บนเพลลาอาศัยหลักการเหวี่ยงกระแทก ทำให้วัสดุแตกเป็นชิ้นเล็กๆ และมีตะแกรงเจาะรูเป็นตัวกรองให้เครื่องบด บดวัสดุให้ได้ขนาดตามต้องการจึงปล่อยออกสู่ถังเก็บวัสดุบดที่ถูกบดแล้วที่บริเวณด้านล่างของเครื่องบด



รูปที่ 4.3 เครื่องบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 เครื่องดูดอากาศ (หมายเลข 3)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการขนส่งชีวมวลผงที่ผ่านเครื่องบดแล้วโดยลมด้วยเครื่องดูดอากาศ (Blower) ขนาด 2 kW เป็นแหล่งจ่ายลมที่มีความเร็วในการขนส่งสูงสุดที่ 21.17 เมตรต่อวินาที (ดังรูปที่ 4.4)

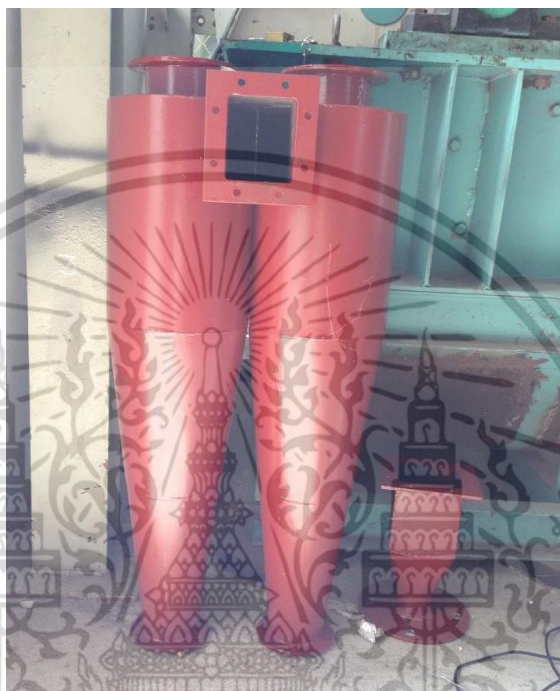


รูปที่ 4.4 เครื่องดูดอากาศ (Vacuum Blower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ไซโคลน (หมายเลข 4)

ไซโคลน (ดังรูปที่ 4.5) จะใช้ในการแยกของผสมระหว่างชีวมวลผงและอากาศที่ไหลมาจากระบบการลำเลียงโดยลมจากเครื่องบดด้วยเครื่องดูดอากาศ โดยที่ชีวมวลผงที่มีขนาดใหญ่จะตกลงสู่ระบบเก็บสะสมเชื้อเพลิงส่วนอากาศและชีวมวลผงที่มีขนาดเล็กมากจะหมุนวนออกทางด้านบนของ Cyclone



รูปที่ 4.5 ไซโคลน

#### 4.1.5 ถังกรองอากาศ (Bag Filter)

จะติดตั้งถังกรองอากาศไว้ที่บริเวณหลังทางออกด้านบนของไซโคลนโดยจะมีเนื้อผ้าของถังกรองอากาศแบบโพลีเอสเตอร์ (PE 501) อัตราการซึมผ่านของอากาศเท่ากับ 0.173 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวินาที ขนาด 0.5 x 1.3 เมตร ใช้ในการทดลองทั้งหมด 2 ตัว และสามารถกรองฝุ่นได้ 0.2 มิลลิเมตรขึ้นไป (ดังรูปที่ 4.6)



รูปที่ 4.6 ถุงกรองอากาศ

#### 4.1.6 ถังเก็บชีวมวลผงที่ถูกไซโคลนตักจับ

ระบบนี้จะใช้ Hopper เป็นตัวเก็บสะสมชีวมวลผงที่ถูกไซโคลนตักจับได้ปริมาณในการกักเก็บที่ออกแบบไว้คือ 1.868 ลบ.ม.



รูปที่ 4.7 ถังเก็บชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

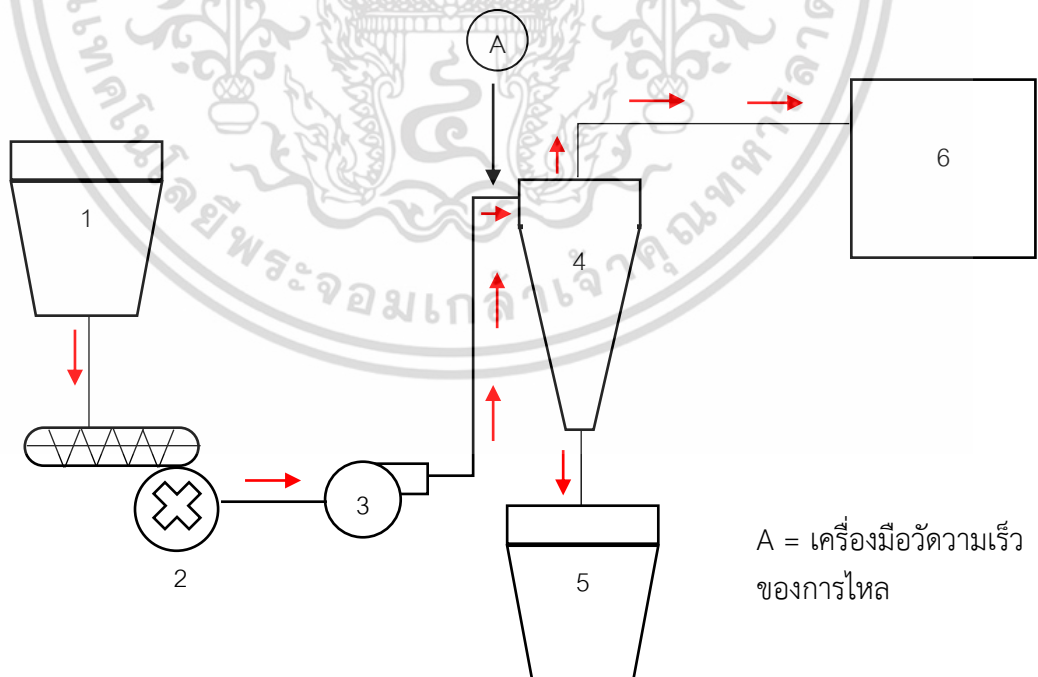
#### 4.1.7 ชีวมวลอัดแท่ง (Pulverized Biomass)

ชีวมวลชนิดยางพาราอัดแท่งที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $373 \text{ Kg/m}^3$  (ดังรูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.8 ชีวมวลอัดแท่ง

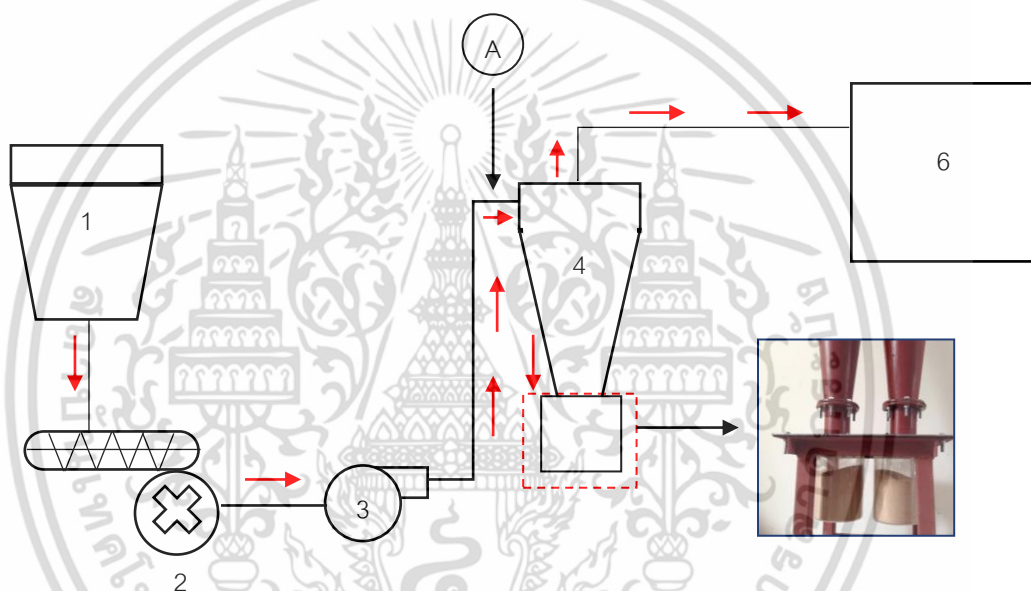
#### 4.2 การทดลองหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลน



รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงอุปกรณ์การทดลองไซโคลน (1) ถังเก็บชีวมวลอัดแท่ง, (2) ระบบบด (3) พัดลมดูดอากาศ, (4) ไซโคลน, (5) ถังเก็บชีวมวลผง, (6) ถังกรองอากาศ (Filter)

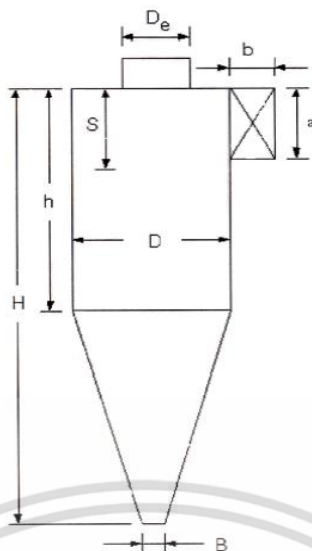
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของไซโคลน ซึ่งจะแสดงแผนภาพอุปกรณ์การทดลองไซโคลนไว้ดังรูปที่ 4.9 ในการทดลองเครื่องดูดอากาศจะทำการลำเลียงชีวมวลผงด้วยความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาทีโดยวัดความเร็วที่ตำแหน่ง A ด้วยเครื่องมือวัดความเร็วของการไหล (Hot Wire Velocity Measurement) ซึ่งการออกแบบของระบบลำเลียงจากเครื่องบดถึงทางเข้าไซโคลน จะอยู่ในส่วนงานวิจัยของพีรพัฒน์ เทพลิบ [16] จากนั้นชีวมวลผงถูกลำเลียงเข้าสู่ไซโคลน ไซโคลนจะทำการคัดแยกชีวมวลผงออกจากอากาศโดยชีวมวลผงที่มีขนาดเล็กจะหลุดออกสู่ทางออกด้านบนของไซโคลนจากนั้นจะเข้าสู่ตัวกรองอากาศ (หมายเลขที่ 6) ก่อนปล่อยออกสู่อากาศ ซึ่งในการทดลองนั้น จะทำการแยกทางออกด้านล่างของไซโคลนออกจากถังเก็บชีวมวลผง (หมายเลขที่ 6) เพื่อทำการเก็บตัวอย่างของชีวมวลผงที่ไซโคลนดักจับได้ไปทำการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งจะนำถัง (Dust bin) มาติดตั้งไว้ที่ทางออกด้านล่างของไซโคลนเพื่อเก็บชีวมวลผงจะแสดงแผนภาพของการทดลองไว้ในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพการทดลองเพื่อเก็บตัวอย่างของชีวมวลผงที่ไซโคลนดักจับได้

จากนั้นชีวมวลผงที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดและชีวมวลผงที่ถูกไซโคลนดักจับได้จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักและทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาค (Sieve Analysis) ทั้งนี้จะมีชีวมวลผงขนาดเล็กบางส่วนไม่ถูกไซโคลนดักจับจะปนไปกับอากาศและหลุดออกไปที่ออกทางด้านบนของไซโคลนชีวมวลผงส่วนนี้จะถูกแยกออกจากอากาศด้วยตัวกรองอากาศ (หมายเลข 6) ก่อนปล่อยออกสู่อากาศ ภายนอกการออกแบบไซโคลนนั้นจะทำการออกแบบตามไซโคลนมาตรฐานของ Stairmand เพราะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูงสุด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.11 ส่วนประกอบของไซโคลน

ตารางที่ 4.1 ขนาดของไซโคลนที่ออกแบบ

ส่วนประกอบ	สัดส่วนไซโคลน	ขนาดไซโคลน (เมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางตัวเรือน (D)	1.000	0.20
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500	0.10
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.200	0.40
ความยาวช่องทางออก (S)	0.500	0.10
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางช่องทางออก (D <sub>e</sub> )	0.500	0.10
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	1.500	0.30
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000	0.80
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.375	0.75

#### 4.2.1 การคำนวณหาจำนวนการหมุนประสิทธิภาพ (N<sub>e</sub>)

การคำนวณหาจำนวนรอบของการหมุนของแก๊สในไซโคลนสามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งปกติแล้วจะมีค่า 5 ถึง 10

$$N_e = \frac{1}{a} \left( h + \frac{H-h}{2} \right) \quad (4.1)$$

$$= \frac{1}{0.1} \left( 0.3 + \frac{0.8-0.3}{2} \right) \quad (4.2)$$

$$N_e = 5.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 4.1 ข้างต้น จะเห็นว่าจำนวนรอบการหมุนถูกคำนวณขึ้นจากสมมุติฐานที่ว่า มวลอากาศจากทางเข้าที่มีความสูง  $a$  ไหลวนโดยปราศจากการคลุกเคล้าหรือแพร่เข้าสู่กระแสการไหลที่บริเวณแกนกลาง โดยไหลลงไปตามตัวเรือนไซโคลนที่มีความสูง  $H$  และเข้าสู่ส่วนกรวยไซโคลนที่มีความสูงประสิทธิผล (effective height) เป็นกึ่งหนึ่งของความสูงแท้จริง  $((H-h)/2)$  จำนวนรอบการหมุนวนจึงหาได้จากการนำความสูงของมวลอากาศที่ไหลเข้าไปหารความสูงรวม

อย่างไรก็ตาม จากแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่ามวลอากาศที่เข้าสู่ไซโคลนมีลักษณะของการไหลปั่นป่วนและมวลอากาศบางส่วนได้ออกจากโดเมนการไหลทางออกด้านบนจึงไม่สามารถแบ่งแยกขอบเขตของการไหลเพื่อหาจำนวนรอบของการหมุนนำมาตรวจสอบกับการคำนวณหาจำนวนรอบการหมุนประสิทธิผลของสมการที่ 4.1 ได้อย่างชัดเจน

#### 4.2.2 คำณวนหาขนาดตัดของอนุภาคเชื้อเพลิง ( $d_{pc}$ )

เมื่ออากาศมีความหนืดเท่ากับ  $1.82 \times 10^{-5}$  kg/m-s และความหนาแน่นของอากาศและเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1.20 และ 232 kg/m<sup>3</sup> จากนั้นจะทำการคำนวณหาขนาดตัดของอนุภาคเชื้อเพลิงตามลำดับจากสมการที่ 4.3

$$d_{pc} = \left( \frac{9\mu_g b}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

$$d_{pc} = 6.76 \mu m$$

ขนาดตัดอนุภาค (Cut Size Diameter) หมายความว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงที่สามารถถูกแยกออกจากอากาศภายใน Cyclone ด้วยประสิทธิภาพการแยก 50% โดยเชื้อเพลิงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 6.76  $\mu m$  จะมีโอกาสถูกแยกออกจากอากาศได้มากกว่า 50% ในขณะที่เชื้อเพลิงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 6.76  $\mu m$  จะมีโอกาสถูกแยกออกจากอากาศได้น้อยกว่า 50%

#### 4.2.3 คำณวนหาประสิทธิภาพในการทำงานของไซโคลน

จากการศึกษาสมมติให้ขนาดของชีวมวลผงที่ถูกไซโคลนดักจับได้ และนำไปหาการกระจายตัวของอนุภาคแต่ละขนาดซึ่งจะจัดอยู่ในช่วงต่างๆตามปริมาณตารางที่ 4.2 นี้

ตารางที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของขนาดเชื้อเพลิงในช่วงต่างๆ

ช่วงที่ ( $j$ )	ขนาด, $\mu m$	ขนาดเฉลี่ย ( $d_{pj}$ ), $\mu m$	สัดส่วนมวล ( $f_j$ ), %
1	0-74	37.0	16.8
2	75-149	112.0	16.9
3	150-179	164.5	12.8
4	180-299	239.5	17.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5	300-354	327.0	7.1
6	355-424	389.5	6.2
7	425-500	462.5	22.2

จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกฝุ่นของเชื้อเพลิงในแต่ละช่วงจากสมการที่ 4.4

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} \quad (4.4)$$

โดยแสดงค่าในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราส่วนขนาดตัดและประสิทธิภาพในแต่ละช่วง

ช่วง (j)	$d_{pc}/d_{pj}$	$\eta_j$
0	0.215	0.956
75	0.071	0.995
150	0.048	0.998
180	0.033	0.999
300	0.024	0.999
355	0.020	1.000
425	0.017	1.000

และจะได้ประสิทธิภาพในแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน จากสมการที่ 4.5

$$\eta = \sum \eta_j f_i \quad (4.5)$$

$$\eta = 99.10$$

จากการออกแบบระบบนี้สามารถแยกเชื้อเพลิงออกจากอากาศได้ ร้อยละ 99.10

### 4.3 รายละเอียดอุปกรณ์ชุดทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลน

เมื่อทำการทดลองแล้วจะเก็บชีวมวลผงที่ถูกไซโคลนดักจับได้มาทำการหาการกระจายตัวของอนุภาคเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของไซโคลน โดยจะนำอนุภาคไปใส่เครื่องคัดขนาด แสดงดังรูปที่ 4.12

#### 4.3.1 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค (Sieve Analysis)

ซึ่งจะทำการคัดแยกชีวมวลผงออกเป็นแต่ละช่วงโดยการสั่นสะเทือน อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะตกลงสู่ที่ตะแกรงด้านล่างโดยขนาดที่จะได้แต่ละช่วงจะขึ้นอยู่กับขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีทั้งหมด 7 ขนาด คือ 0, 75, 150, 180, 300, 355 และ 425 ไมครอน

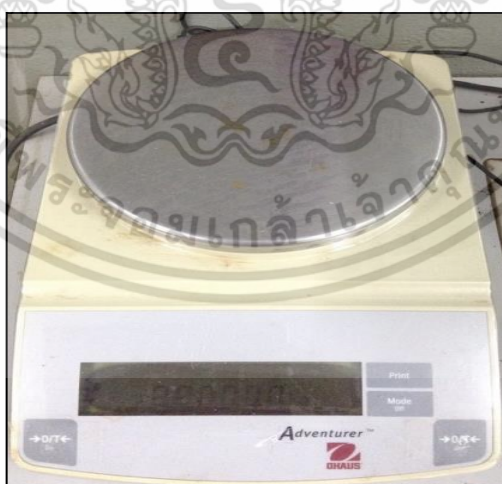
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 เครื่องคัดขนาดอนุภาค

#### 4.3.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนัก ARC120 ซึ่งมีความละเอียดในการชั่งเท่ากับ 0.01 กรัม ในการทดลองจะนำเอาชีวมวลผงที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาชั่งเพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแต่ละช่วง



รูปที่ 4.13 เครื่องชั่งน้ำหนัก “ ARC120 ” 0.01 กรัม

#### 4.3.3 เครื่องวัดความเร็วของการไหล

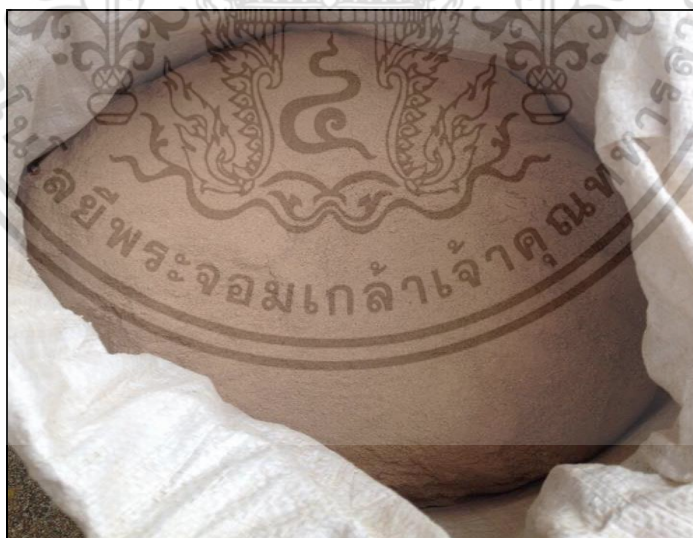
มีช่วงในการวัดตั้งแต่ 0.15 ถึง 30 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะนำมาใช้วัดความเร็วของการไหลก่อนเอกสารทางเข้าไซโคลนส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เครื่องวัดความเร็วลม (Hot Wire) รุ่น VT100 ยี่ห้อ Kimco

#### 4.3.4 ซิวมวลผง

ซึ่งเป็นไมยางพาราอัดแท่งและผ่านกระบวนการบดด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรจากนั้นจะถูกลำเลียงเข้าสู่ไซโคลน



รูปที่ 4.15 ซิวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ขั้นตอนการทดสอบหาประสิทธิภาพของไซโคลน

1. ทำการลำเลียงชีวมวลอัดแท่งเข้าสู่เครื่องบดขนาดตะแกรง 0.5 มิลลิเมตรด้วยสกรูลำเลียง
2. เครื่องบดทำการบดชีวมวลอัดแท่งให้มีขนาดเล็กลงกลายเป็นชีวมวลผงขนาดเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรและตกลงสู่ถังพักด้านล่างของเครื่องบด
3. ทำการวัดความเร็วลมก่อนเข้าไซโคลนโดยกำหนดความเร็วไว้แต่ละรอบที่ 8 และ 10 เมตรต่อวินาที
4. เครื่องดูดอากาศทำการดูดชีวมวลผงหนัก 1 กิโลกรัมที่บริเวณถังพักด้านล่างของเครื่องบดเพื่อลำเลียงเข้าสู่ไซโคลน
5. เก็บชีวมวลผงที่ไซโคลนดักจับได้ไปชั่งน้ำหนัก
6. ทำการหาการกระจายตัวของอนุภาคแต่ละขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงทั้งหมด 7 ขนาด ได้แก่ 0, 75, 150, 180, 300, 355 และ 425 ไมครอน โดยจะทำการแบ่งเอาอนุภาคเพื่อหาการกระจายตัวมีน้ำหนักครั้งละ 200 กรัม และทำการจับเวลาครั้งละ 10 นาที
7. เมื่อทำการหาการกระจายตัวเสร็จแล้ว นำชีวมวลที่อยู่ในตะแกรงแต่ละขนาดไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของชีวมวลผงทั้งหมด
8. หาประสิทธิภาพของไซโคลนตามขั้นตอนและสมการที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.4.3



## บทที่ 5

# การจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการตรวจสอบความแม่นยำ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS 12.0 ในการจำลองเชิงตัวเลขจากนั้นจะทำการตรวจสอบความแม่นยำของสนามการไหลกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Shukla และคณะ [10] ซึ่งเลือกใช้ไฮโคลน Stairmand แบบประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคดี เมื่อทำนายสนามการไหลที่ถูกต้อง จากนั้นจะทำการปล่อยอนุภาคเข้าสู่ไฮโคลนเพื่อศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคโดยเริ่มต้นผู้วิจัยจะทำการตรวจสอบความแม่นยำของประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไฮโคลนเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Shukla และคณะ [11] จากนั้นจะทำการปล่อยอนุภาคเดี่ยวแต่ละขนาดเข้าสู่ไฮโคลนที่ตำแหน่งต่างๆบริเวณทางเข้าไฮโคลนเพื่อศึกษาเส้นทางเดินของชีวมวลผงภายในไฮโคลน

### 5.1 การสร้างแบบจำลองไฮโคลน

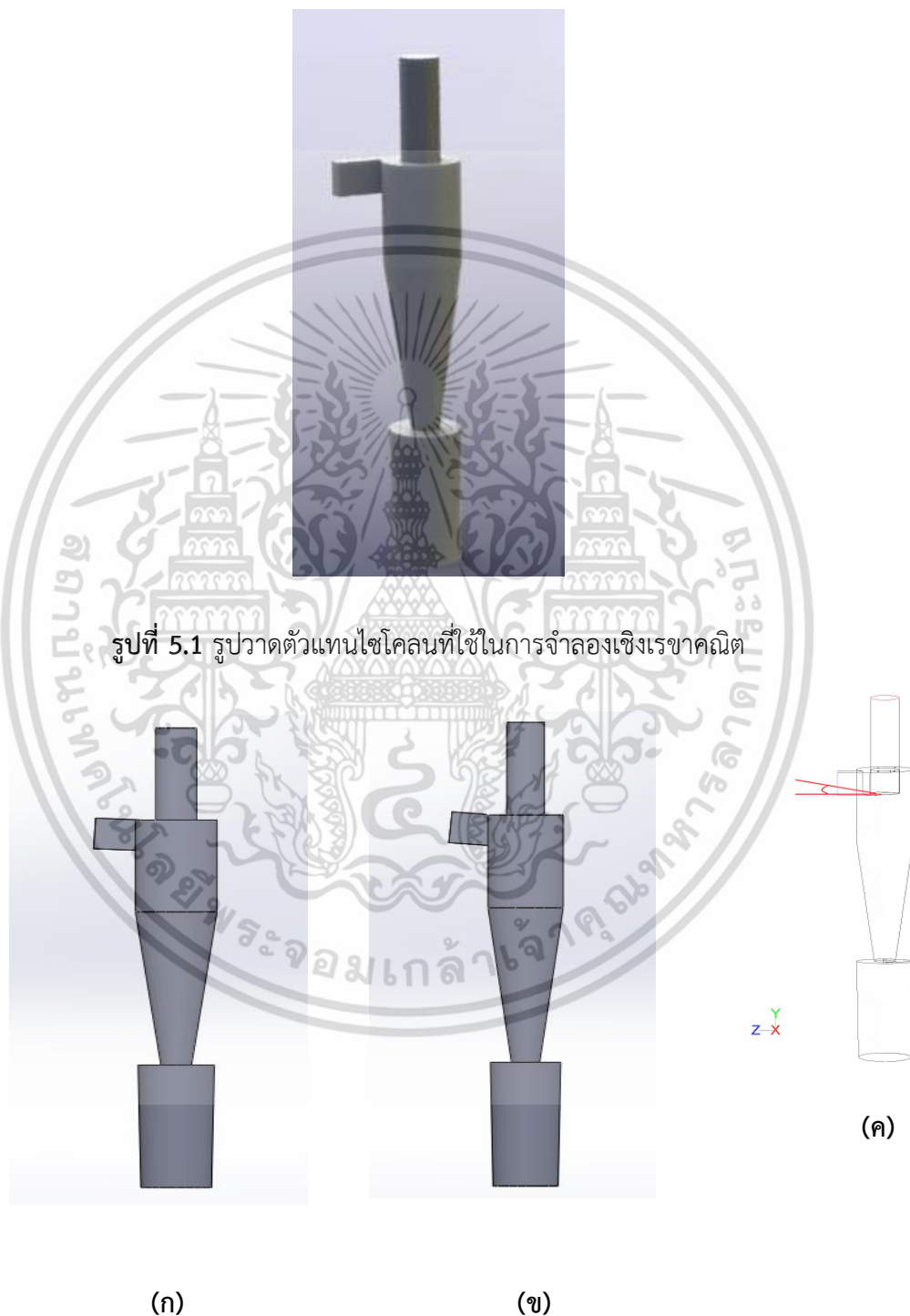
เมื่อออกแบบไฮโคลนสัดส่วนตามมาตรฐาน (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) เพื่อจำลองการไหลภายในไฮโคลน ผู้วิจัยจะอธิบายขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการไหลและวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่กำหนดพื้นที่และขอบเขตการไหลด้วยโปรแกรม Solid Work 2014 เพื่อเป็นตัวแทนของไฮโคลนตามรูปจริงทางเรขาคณิต เพื่อให้สามารถจำลองอุปกรณ์ที่ต้องการศึกษาเป็นตัวกำหนดพื้นที่การเกิดกิจกรรมต่างๆ โดยผู้ใช้จะต้องกำหนดค่าขอบเขตต่างๆเพื่อเป็นค่าตั้งต้นสำหรับแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยต่อไป
2. เมื่อสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตเสร็จแล้ว จากนั้นทำการแบ่งปริมาตรของอุปกรณ์เหล่านี้ ออกเป็นหน่วยปริมาตรเล็กๆจำนวนมากที่เชื่อมต่อกันเป็นอุปกรณ์ที่จะศึกษาด้วยโปรแกรม Meshing
3. จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งเข้าโปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent) เพื่อทำการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์วอลุ่ม (Finite Volume Method) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณแก่สมการสำหรับแบบจำลองการไหล (Post-Processing) และส่วนของโปรแกรมฟลูเอนท์ แบ่งได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้
  - 3.1 เลือกสมการการคำนวณสำหรับแบบจำลอง (Models)
  - 3.2 เลือกวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง (Materials)
  - 3.3 กำหนดเงื่อนไขสำหรับขอบเขตที่จะใช้กับแบบจำลอง (Boundary Condition)
  - 3.4 กำหนดค่าเริ่มต้น (Initialize Value)
  - 3.5 จำนวนจำนวนรอบในการวนซ้ำ (Iteration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Solid Work 2014

ในการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตด้วยโปรแกรม Solid Work 2014 เพื่อเป็นตัวแทนของไฮโดรอนตามรูปจริงดังรูปที่ 5.1 และทำการปรับเปลี่ยนมุมทางเข้าไฮโดรอนที่ 3 และ 5 องศา ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3



รูปที่ 5.2 รูปวาดตัวแทนไฮโดรอนปรับเปลี่ยนมุมทางเข้าที่ใช้ในการจำลองเชิงเรขาคณิต ก) มุมทางเข้าไฮโดรอน 3 องศา ข) มุมทางเข้าไฮโดรอน 5 องศา (ค) จุดเปลี่ยนมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 รูปวาดตัวแทนไซโคลนเชิงเรขาคณิตจะถูกทำการแบ่งปริมาตรของอุปกรณ์เหล่านี้ ออกเป็นหน่วยปริมาตรเล็กๆ (Mesh) โดยมีโครงสร้างแบบ Hexahedral ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และทำการเปรียบเทียบจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนกริดจาก 197,000, 390,000 และ 537,000 กริด จะกำหนดจุดเริ่มต้น  $x,y,z=0$  ที่จุด A ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งจุดเริ่มต้นในวาดตัวแทนไซโคลนเชิงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5.4 เมชโครงสร้าง Hexahedral ของไซโคลนนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาสนามการไหลในไซโคลน

โดยจะเริ่มต้นใช้การจำลองที่สภาวะคงตัว (Steady State) เพื่อศึกษาสนามการไหลและเลือกทำการจำลองการไหลแบบ K-epsilon โดยจะกำหนดเงื่อนไขต่างๆเป็นค่าเริ่มต้น (Default) ตั้งค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณซ้ำ (Iteration) เท่ากับ 2,000 รอบ จากนั้นเลือกใช้แบบจำลองที่สภาวะขึ้นกับเวลา (Transient) และเลือกกำหนดเป็นค่าความเครียดเรย์โนลด์ (Reynolds Stress Model : RSM วสันต์ ศรีเมือง [17] ) ได้ทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนระหว่าง K-epsilon และ RSM มาจำลองการไหลพบว่าการใช้แบบจำลองแบบปั่นป่วน RSM เท่านั้นที่สอดคล้องกับการทดลองจริง และได้รับการยอมรับว่ามีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของสนามการไหลในไซโคลนโดยสมการความต่อเนื่องที่ใช้สำหรับเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็ว จากนั้นกำหนดที่ทางเข้าของไซโคลนเป็นความเร็วขาเข้า (Velocity inlet) โดยจะกำหนดค่าเท่ากับ 21 เมตรต่อวินาที และกำหนดให้มีค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ  $-9.81$  ( กำหนดให้แกน y ทำมุมตั้งฉากกับผิวโลก ) และค่าความดันแวดล้อมเท่ากับ  $101,325$  Pa โดยสมมุติฐานที่ใช้เพื่อวิเคราะห์สนามการไหลจะกำหนดรายละเอียดรูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลดังตารางที่ 5.1 นี้ และทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตพื้นที่ผิวของไซโคลนดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 รูปแบบการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการจำลองเชิงตัวเลขของการไหล

เงื่อนไขขอบเขต	การตั้งค่า
รูปแบบ (Schemes)	SIMPLEC
ความดัน (Pressure)	Presto!
โมเมนตัม (Momentum)	Second Order Upwind
พลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)	Second Order Upwind
อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน (Turbulent Dissipation Rate)	Second Order Upwind
ความเครียดเรย์โนลด์ (Reynolds Stresses)	First Order Upwind
ขนาดของขั้นเวลา (Time Step Size (s))	0.0001
จำนวนของขั้นเวลา (Number of Time Step )	20,000
จำนวนรอบที่มากที่สุด / ขั้นเวลา (Max. Iteration / Time Step)	20

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขขอบเขตพื้นที่ของไซโคลน

พื้นที่ของไซโคลน	การตั้งค่า
ทางเข้า (Inlet)	Inlet-Velocity
ผนังท่อทางออกไซโคลน (Vortex Finder)	Wall
ทางออกด้านบนไซโคลน (Top Outlet)	Pressure-Outlet
ผนังถังเก็บชีวมวลผง (Dustbin)	Wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 รูปไซโคลนที่แสดงการกำหนดเงื่อนไข

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ทางออกกำหนดเป็นแบบ Outflow ซึ่งให้ค่าพลาซิกซ์ของการแพร่มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยไม่คิดผลจากความดันที่ทางออกย้อนกลับ (Back Pressure) และการไหลจะอยู่ในช่วงที่พัฒนาแล้ว (Fully Developed) โดยจะกำหนดเงื่อนไขการดำเนินการของการไหลแบบเฟสเดียว (Single Phase Flow) ในไซโคลนจะกำหนดโดยเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) เท่ากับ 280,000 โดยได้จากสมการที่ 5.1 กำหนดค่าความเข้มข้นปั่นป่วน (Turbulent Intensity,  $I$ ) เท่ากับ 0.1 และ Length scale ( $l_s$ ) หาได้จากสมการที่ 5.2

$$Re = \frac{DV_{in}\rho}{\mu} \quad (5.1)$$

$$\text{สมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก} = 4ab / (a+b) \quad (5.2)$$

หาค่า Normal Stress ได้จากสมการที่ 5.3 และกำหนด shear stresses ที่ทางเข้าไซโคลนเท่ากับศูนย์

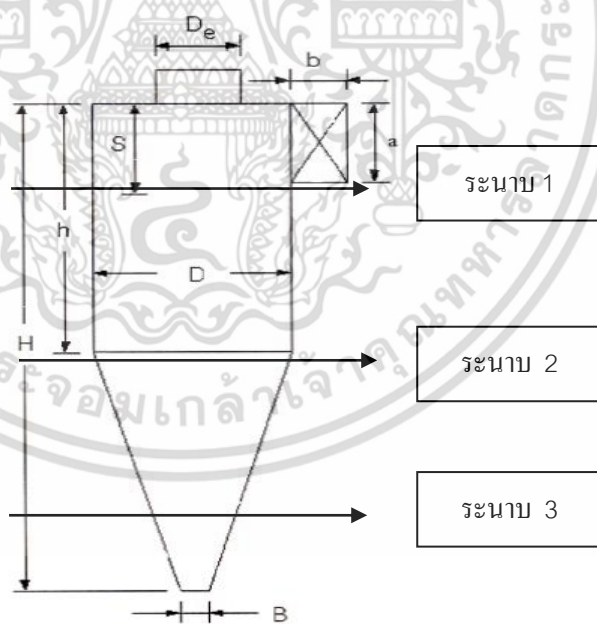
$$\text{Normal Stress} = \frac{2k}{3} \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า  $k$  ได้จากสมการที่ 5.3

$$k = \frac{3}{2}(U_{in}I)^2 \quad (5.4)$$

และค่าที่จะแสดงเพื่อทำการตรวจสอบเช่น ความเร็ว และความดัน ควรได้รับการตรวจสอบจนกว่าจะมีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าการจำลองแสดงการลู่เข้าแล้ว (Converged) ที่  $(t = 1.5-1.6 \text{ s})$  แต่ในการหาผลที่แม่นยำจะทำการจำลองต่อไปจนถึงที่  $2\text{ s}$  หลังจากที่ได้อาค่งที่ของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) กับเวลาที่จุดที่กำหนดไว้บริเวณทางเข้าและท่อทางออกของไซโคลน จะมีตำแหน่งเท่ากับ  $0.75D$  โปรแกรมฟลูเอนท์จะทำการเริ่มต้นสุ่มตัวอย่างข้อมูลสถิติเวลาสำหรับทั้งโดเมนของไซโคลน (ส่วนประกอบความเร็วและความดันสถิต) แต่ละเกณฑ์การลู่เข้าของค่าตอบ (Time Step) ตั้งแต่  $(t = 1.5-1.6 \text{ s})$  จากนั้นจะทำการแบ่งระนาบไซโคลน 3 ระนาบของงานวิจัย Shukla [11] ดังตารางที่ 5.3 เพื่อตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) และความเร็วตามในทิศทางตามแนวแกน (Axial Velocity) ข้อกำหนดในการเลือกพิจารณาทั้ง 3 ระนาบ เนื่องจากที่ระนาบ 1 อยู่บริเวณปลายท่อทางออกด้านบนเป็นจุดเริ่มต้นของการหมุนวนของอากาศและจุดปลายของกระแสอากาศหมุนวนด้านใน ระนาบที่ 2 บริเวณที่รัศมีของไซโคลนลดลงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสนามการไหล ที่ระนาบ 3 จุดเริ่มต้นของกระแสอากาศหมุนวนด้านใน



รูปที่ 5.6 ไซโคลนที่แบ่ง 3 ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ตำแหน่งที่แบ่งระนาบของไซโคลน

ระนาบ 1	ระนาบ 2	ระนาบ 3
0.75D	1.25D	1.75D
$y = -217.5$ (mm.)	$y = -362.5$ (mm.)	$y = -425.5$ (mm.)

#### 5.4 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาเส้นทางเดินอนุภาคในไซโคลน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาเส้นทางเดินอนุภาคในไซโคลนโดยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลองของงานวิจัย Shukla และคณะ [11] ซึ่งทำการวิจัยเปรียบเทียบรูปแบบการวิเคราะห์เส้นทางเดินอนุภาคด้วยวิธีเชิงคณิตศาสตร์ โดยใช้สนามการไหลที่ได้จากวิธีการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของงานวิจัย Shukla และคณะ [10] ซึ่งในการจำลองได้เลือกใช้ระเบียบวิธีแบบ Eulerian-Lagrangian และติดตามเส้นทางเดินของการกระจายตัวอนุภาคในไซโคลน การปล่อยอนุภาคเข้าไปสู่ไซโคลนซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวล โมเมนตัม และพลังงาน เพื่อการจำลองที่ถูกต้องจึงใช้ตัวเลือกแบบ Interaction with Continuous Phase โดยจะมีการลู่เข้า (Converge) ของสนามการไหลที่ต่อเนื่องใน Lagrangian ด้วยวิธีการไหลแบบหลายเฟส (Discrete Phase Model) จากนั้นจะกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของการปะทะระหว่างอนุภาคและผนังและอนุภาคด้วยกันเองให้มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.8 และกำหนดเงื่อนไขในการดำเนินการของอนุภาคแสดงที่ตาราง 5.4

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขในการดำเนินการของอนุภาค

	การตั้งค่า
Model (รูปแบบ)	Discrete Phase
วัสดุ (Material)	Talcum Powder
ประเภทของวัสดุ (Type of Material)	Inert
ความหนาแน่น (Density)	2,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
จำนวนขั้นเวลา (Number of Iteration Step)	500,000
Length Scale	0.005 เมตร
Discrete Phase Modelling Assumption	Spherical Particle
Update DPM Sources Every Flow Iteration	10
Stochastic Tracking	Discrete Random Walk Model

โดยกำหนดให้อนุภาคถูกปล่อยจากพื้นที่ทางเข้าของไซโคลน (Cyclone) ความเร็วของอนุภาคจะเท่ากับความเร็วที่อากาศทางเข้าของไซโคลน เมื่ออนุภาคกระทบพื้นที่ผิวภายในไซโคลนโดยอาจมีลักษณะเหตุการณ์ต่างๆเกิดขึ้น แต่ในการจำลองเชิงคณิตศาสตร์นี้จะทำการตั้งค่าพื้นที่ผิวของด้านต่างๆภายในไซโคลนดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขขอบเขตที่พื้นที่ผิวของไซโคลน

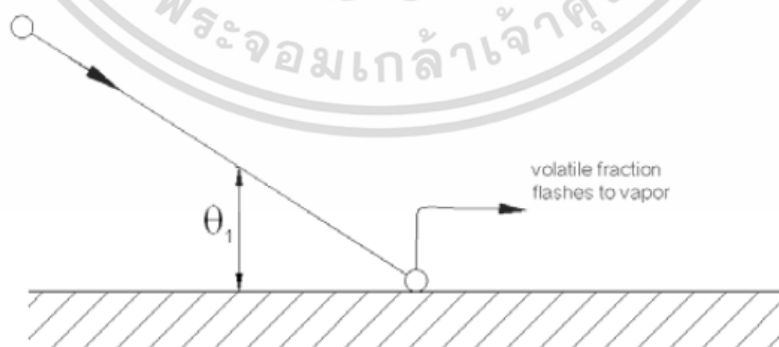
พื้นที่ไซโคลน	การตั้งค่า
ทางเข้าไซโคลน (Inlet)	Escape
ทางออกด้านบน (Top Outlet)	Escape
พื้นที่ผิวด้านล่างของถังเก็บฝุ่น (Dust Bin)	Trap

การตั้งค่าให้พื้นที่ผิวทางเข้าและทางออกของไซโคลนให้เป็น Escape เนื่องจากหากอนุภาควิ่งมากระทบที่พื้นที่ผิวที่กำหนดไว้จะสมมติให้อนุภาคมีเส้นทางเดินสิ้นสุดที่บริเวณดังกล่าว และอนุภาคจะไม่ถูกนำมาคำนวณเส้นทางเดินอนุภาค



รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะเมื่ออนุภาควิ่งมากระทบพื้นที่ผิวไซโคลน

กำหนดทางออกด้านล่างของไซโคลนให้เป็น Trap อนุภาคจะสิ้นสุดตามการคำนวณวิถีการไหล (Trajectory) โดยอนุภาคที่ตกกระทบจะถูกเก็บบันทึกเพื่อแสดงจำนวนอนุภาคที่ตกลงสู่ผนังของไซโคลน



รูปที่ 5.8 แสดงเงื่อนไขขอบเขตแบบ Trap ของการจำลองการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

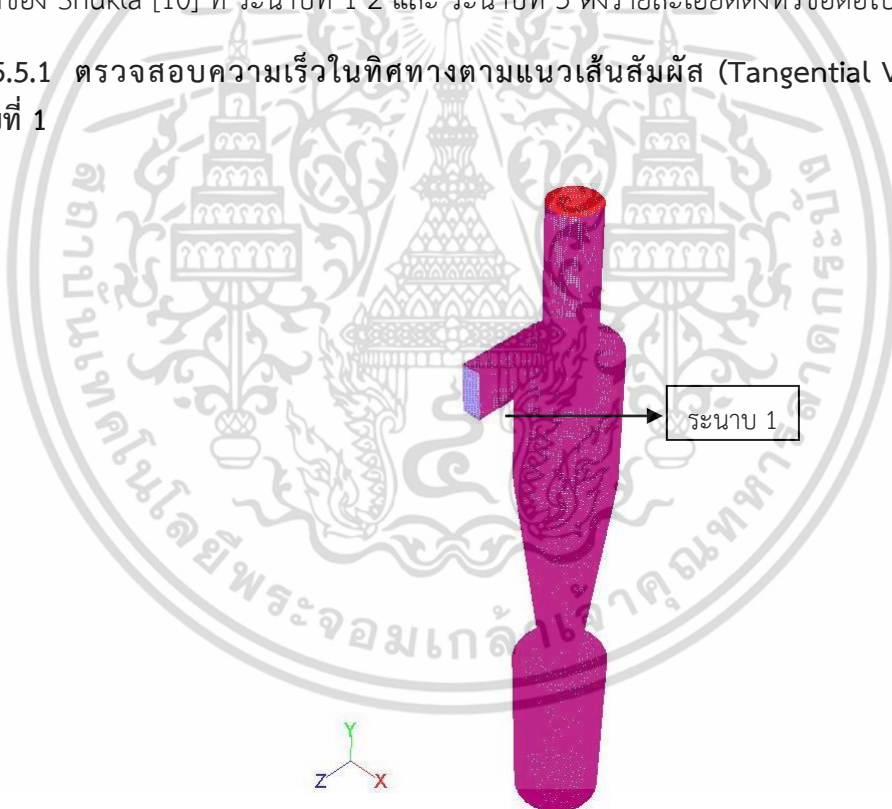
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองเชิงตัวเลขจะทำการพิจารณาแรงที่กระทำในชีวมวลผงเพิ่มขึ้น คือ Saffman เพื่อพิจารณาอิทธิพลของแรง Saffman ที่มีผลต่อเส้นทางเดินชีวมวลผง ในการประเมินผลของการปล่อยอนุภาคเข้าสู่ไซโคลนแบบกระจายตัวด้วยการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งในงานวิจัยของ Shukla [11] จากการตรวจสอบพบว่ารูปแบบของ Implicit & Trapezoidal มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เส้นทางเดินของอนุภาคมากที่สุด

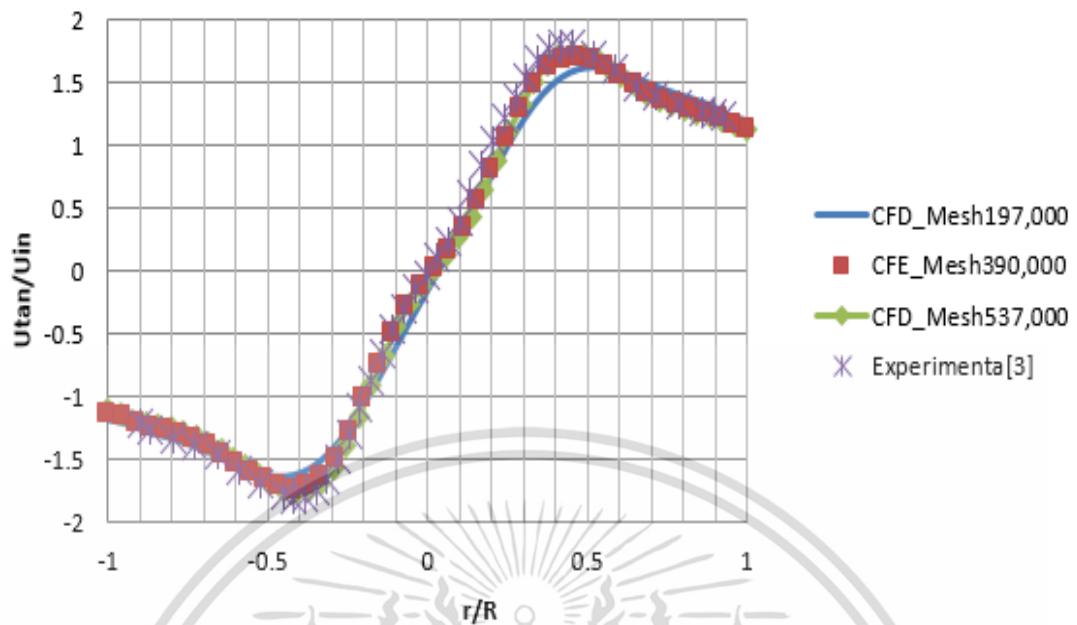
## 5.5 ผลการตรวจสอบความแม่นยำของการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลน

เพื่อหาความแม่นยำและลดเวลาในการคำนวณของการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลนนั้นจะทำการเปรียบเทียบความละเอียดของเมชแต่ละขนาดเพื่อดูผลการจำลองการไหลโดยอธิบายขั้นตอนการตรวจสอบโดย ตรวจสอบจำนวนของเมชที่มีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) และความเร็วในทิศทางตามแนวแกน (Axial Velocity) โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Shukla [10] ที่ ระบายที่ 1 2 และ ระบายที่ 3 ดังรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

### 5.5.1 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) ที่ ระบายที่ 1



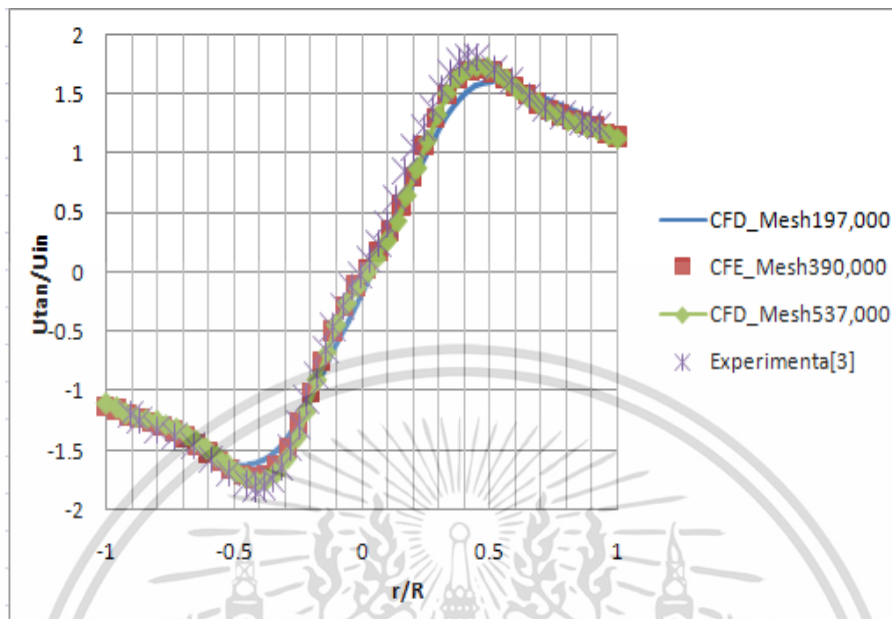
รูปที่ 5.9 ตำแหน่งระบายที่ 1



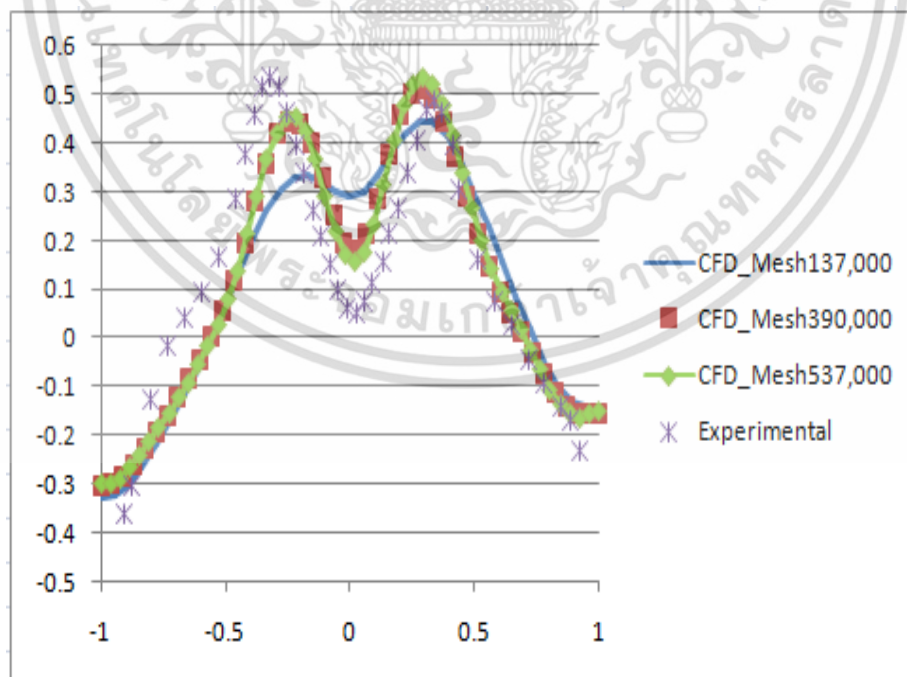
รูปที่ 5.10 ค่าเฉลี่ยของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสที่ระนาบที่ 1 ( $y = -217.5 \text{ mm.}$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ

จากการตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential velocity) ที่ระนาบที่ 1 พบว่าผลการทดลองมีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่เมชจำนวน 197,000, 390,00 และ 537,000 กริด โดยนำมาเทียบกับผลการทดลองของ Shukla และคณะ [10] ซึ่งใช้เครื่อง laser doppler Velocimetry ในการวัดความเร็วที่รัศมีตามเส้น center line ของไซโคลน ( $r/R = -1.0 - 1.0$ ) ภายในไซโคลนที่ระนาบที่ 1 พบว่าที่จำนวนเมช 537,000 กริด นั้นมีความเหมาะสมและให้ความแม่นยำในการคำนวณมากที่สุด

5.5.2 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) และความเร็วในทิศทางตามแนวแกน (Axial Velocity) ที่ ระบายที่ 1



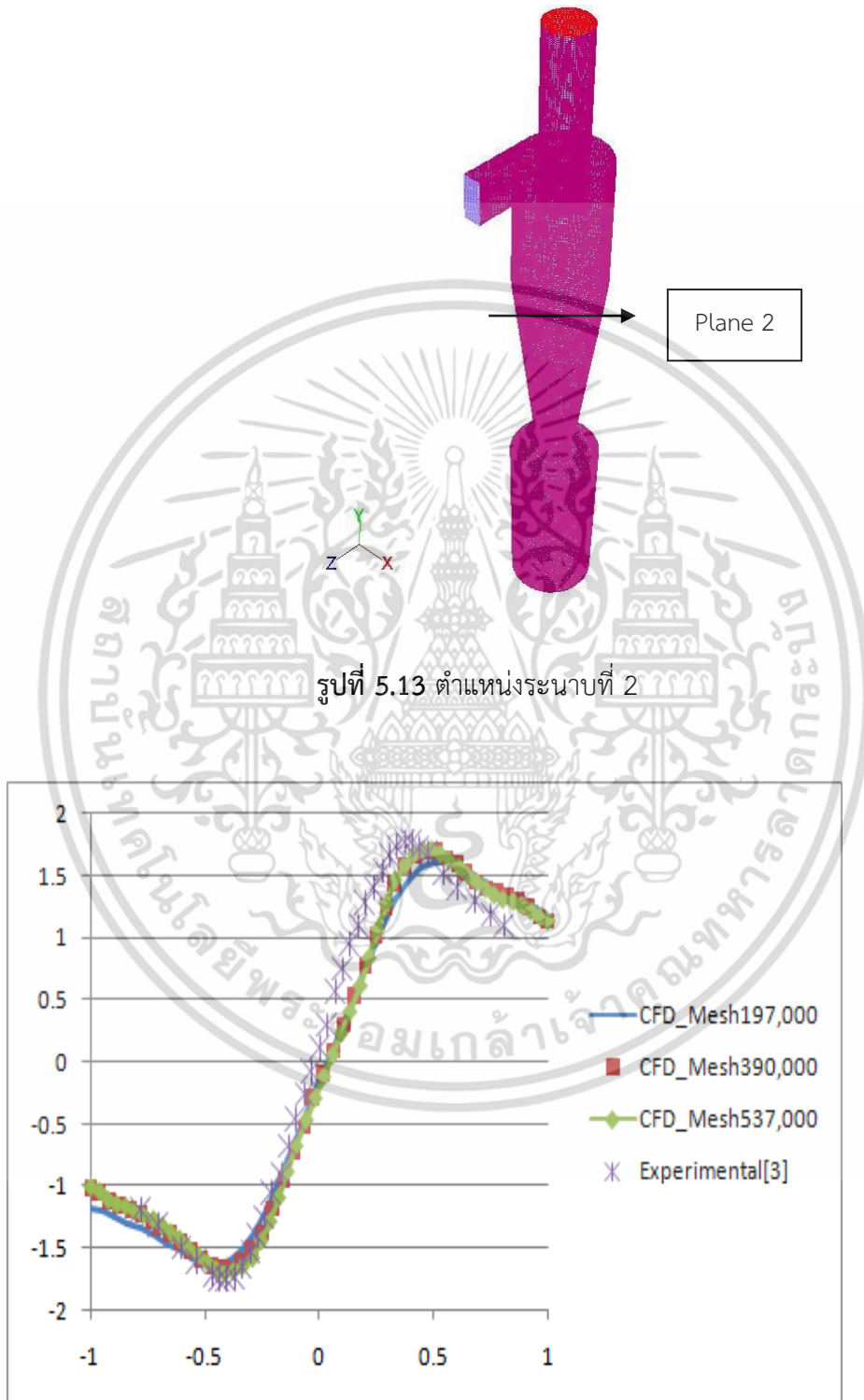
รูปที่ 5.11 ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสที่ระบายที่ 1 ( $y=-217.5$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ



รูปที่ 5.12 ความเร็วตามแนวแกนที่ระบายที่ 1 ( $y=-217.5$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ

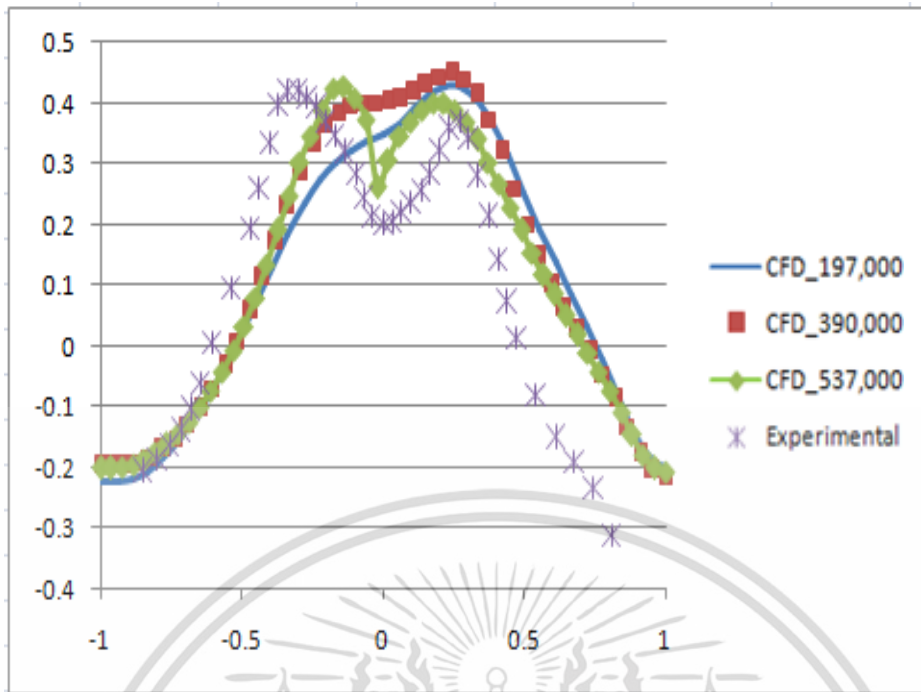
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) และความเร็วในทิศทางตามแนวแกน (Axial Velocity) ที่ ระนาบที่ 2



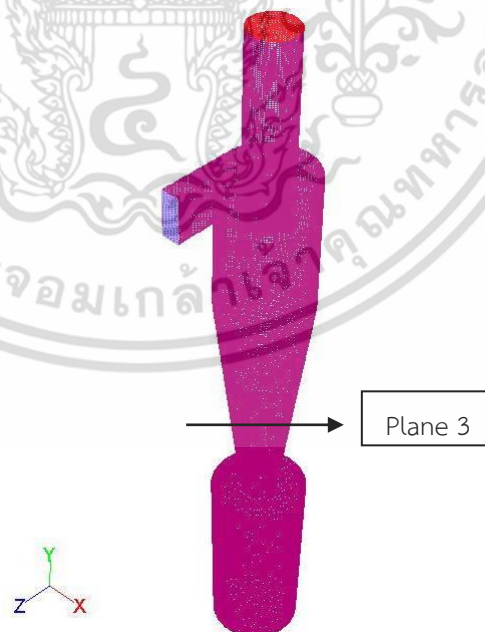
รูปที่ 5.14 ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสที่ระนาบที่ 2 ( $y=-362.5$ ) ที่จำนวนเมชต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



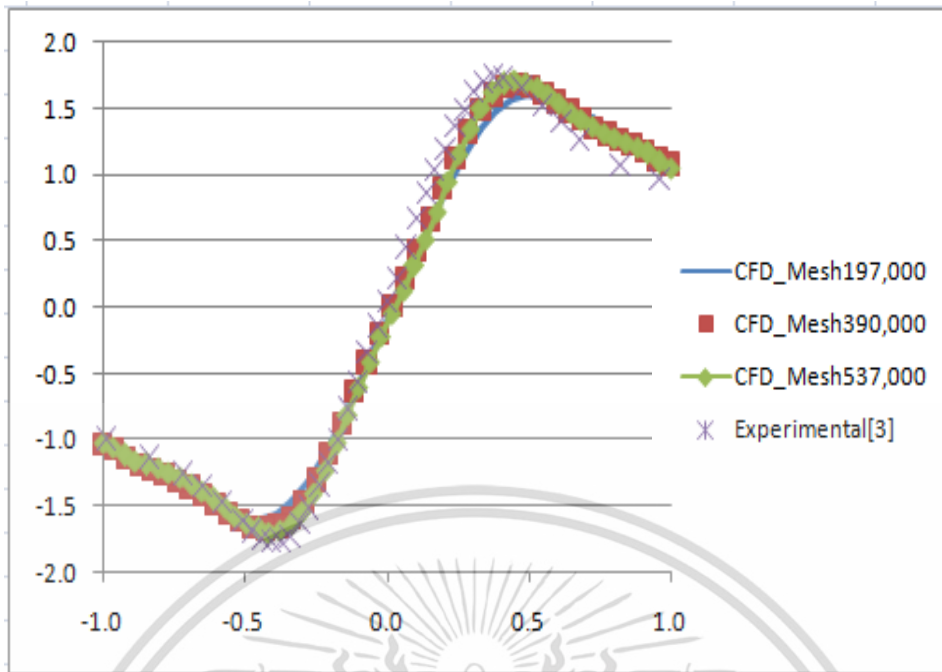
รูปที่ 5.15 ความเร็วตามแนวแกนที่ระนาบที่ 2 ( $y=-362.5$  mm.) ที่จำนวนเมชต่างๆ

5.5.4 ตรวจสอบความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Velocity) และความเร็วในทิศทางตามแนวแกน (Axial Velocity) ที่ ระนาบที่ 3

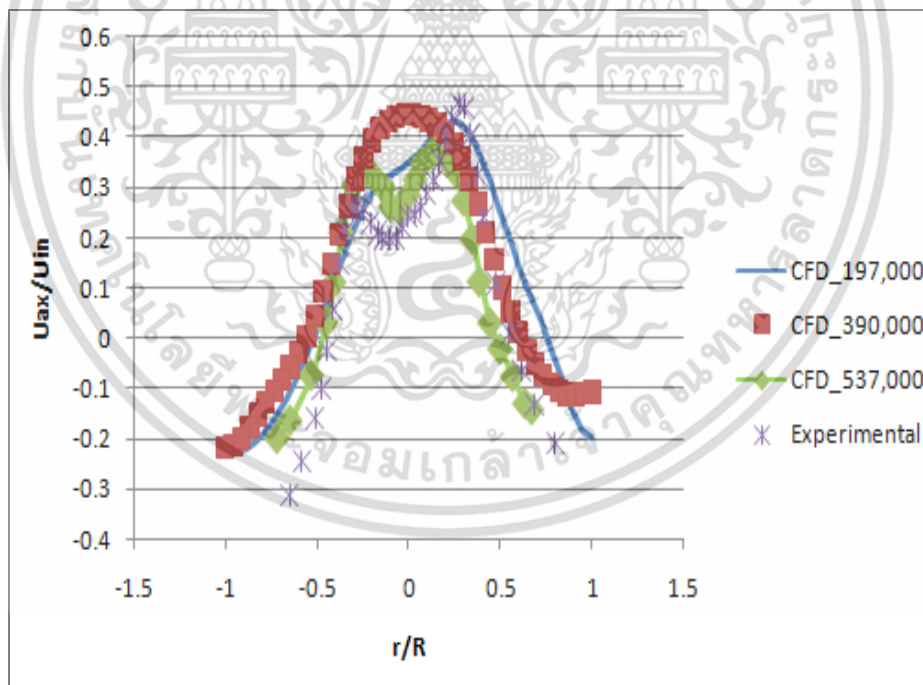


รูปที่ 5.16 ตำแหน่งระนาบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสที่ระนาบที่ 3 ( $y=-425.5$  mm.) ที่จำนวนเมชต่างๆ



รูปที่ 5.18 ความเร็วตามแนวแกนที่ระนาบที่ 3 ( $y=-425.5$  mm.) ที่จำนวนเมชต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องและสนามการไหลภายในไซโคลน

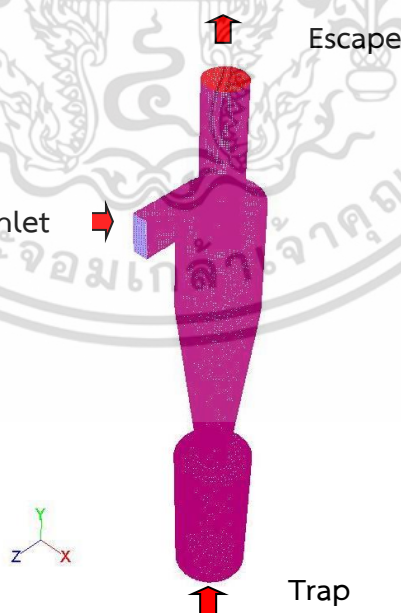
จากการทำนายสนามการไหลในไซโคลนที่ระนาบ 1,2 และ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกนพบว่าที่เมฆขนาด 537,000 กริต มีผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Shukla และคณะ [11] จากระนาบที่ 1,2 และ 3 เมื่อเทียบอัตราส่วน ( $U_{tan}/U_{inlet}$ ) พบว่ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.8 เมตรต่อวินาที และค่าต่ำสุดเท่ากับ -1.8 เมตรต่อวินาที โดยจะมีค่าเท่ากันทั้งหมดเนื่องจากในบทความได้กำหนดความเร็วที่ทางเข้าเท่ากับ 20 เมตรต่อวินาทีและมีความสม่ำเสมอ (uniform) ในส่วนของความเร็วในทิศทางตามแนวแกนและมีความเร็วบริเวณใกล้ผนังติดลบมีทิศทางพุ่งลง เมื่อเทียบอัตราส่วน ( $U_{Axial}/U_{inlet}$ ) พบว่าที่ระนาบที่ 3 ความเร็วสูงที่สุดมีค่าต่ำลงเนื่องจากมวลอากาศเกิดการอัดตัวและมีความเร็วลดลง

## 5.7 ผลการตรวจสอบความแม่นยำของการจำลองเชิงตัวเลขของการปล่อยอนุภาคเข้าสู่ไซโคลน

ในวิธีการนี้จะใช้ผลของการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลนจากหัวข้อก่อนหน้านี้และทำการปล่อยอนุภาคเข้าไปในไซโคลนจากนั้นจะทำการตรวจสอบความแม่นยำของประสิทธิภาพไซโคลนกับผลการทดลองของงานวิจัยของ Shukla และคณะ [11] สำหรับผลการหาประสิทธิภาพของไซโคลนนี้จะใช้การหาได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคไซโคลน} = \frac{\text{ปริมาณที่ไซโคลนดักจับได้}}{\text{ปริมาณอนุภาคที่ปล่อยเข้าสู่ไซโคลน}}$$

จากการกำหนดพื้นที่ของไซโคลนในโปรแกรมฟลูเอนท์ดังตาราง 4.1 จะได้ว่า

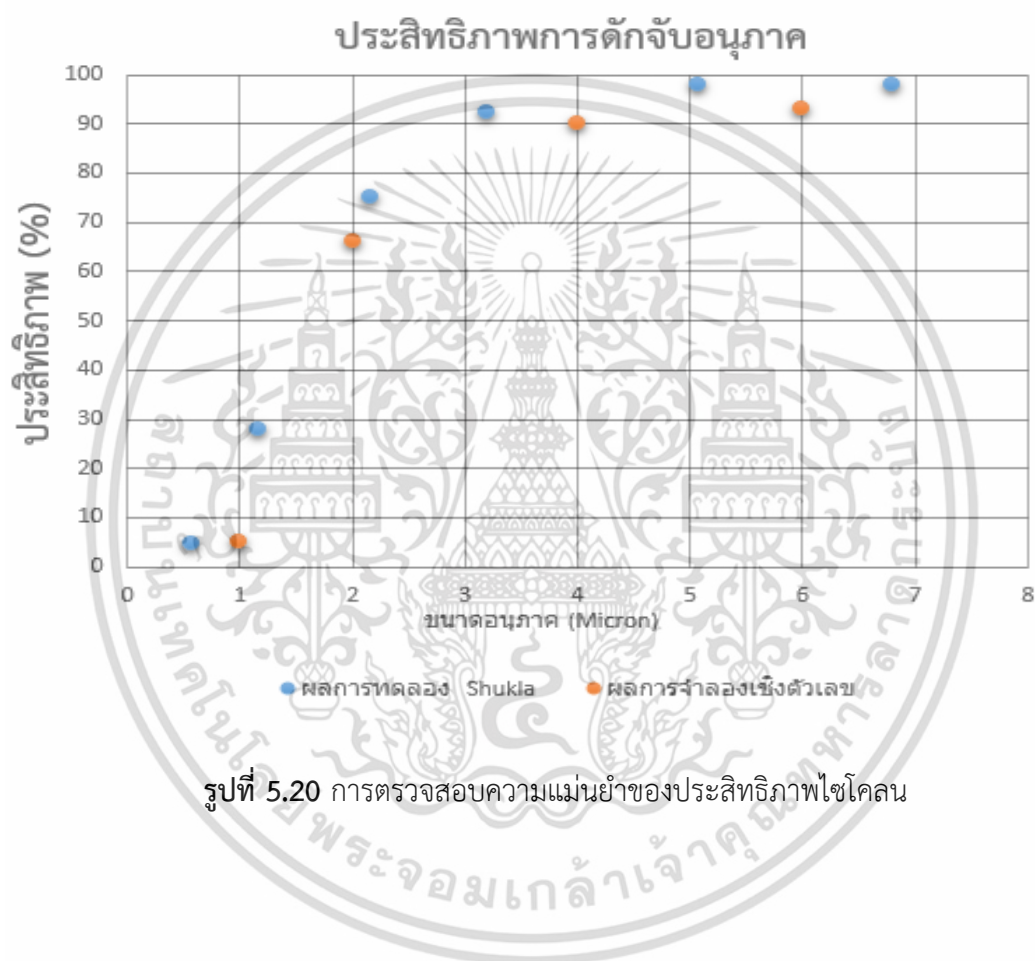


รูปที่ 5.19 ไซโคลนที่กำหนดปรากฏการณ์ของพื้นที่ผิว

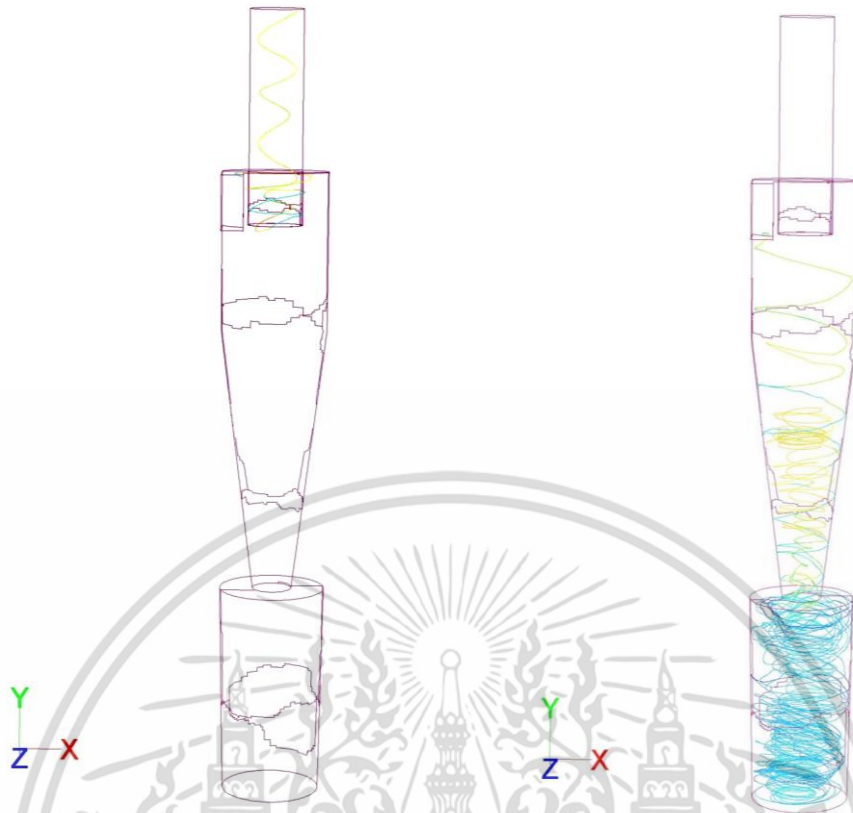
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคไซโคลน} = \frac{n_{\text{Particle, Trap}}}{n_{\text{Injected}} - n_{\text{incompleted}}}$$

ในการจำลองเชิงคณิตศาสตร์นั้นได้เลือกทำนายประสิทธิภาพของอนุภาคขนาด 1,2,4 และ 6 ไมครอน เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการหาประสิทธิภาพของไซโคลน จากกราฟพบว่าผลของการทดลองจากงานวิจัย Shukla [11] และการจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ลักษณะของขีวมวลที่หลุดลงด้านล่าง (Escape) และ สะดุ้งที่ทางออกด้านล่าง (Trap)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากบทที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงหลักการทำงานและกระบวนการคัดแยกของไซโคลน รวมไปถึงวิธีการทดลอง เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้กับแบบจำลองเชิงตัวเลข และการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนายสนามการไหลและประสิทธิภาพไซโคลน สำหรับบทนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลนและขนาดตัดของอนุภาค (Cut Size Diameter) คือ ขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพมากกว่า 50% คือ อนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัดอนุภาคจะถูกไซโคลนดักจับด้วยประสิทธิภาพมากกว่า 50% โดยหาได้จากสมการที่ 4.3 และผลการจำลองเชิงตัวเลขของสนามการไหล การทำนายเส้นทางเดินของชีวมวลผงภายในไซโคลนโดยกำหนดจุดปล่อยที่ตำแหน่งต่างๆบริเวณทางเข้าไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที ในการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลองจะนำไปสู่ความเข้าใจทางด้านกลไกการทำงานของเครื่องคัดแยกในไซโคลน รวมไปถึงลักษณะเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่แต่ละตำแหน่งจุดปล่อยและมุมของทางเข้าไซโคลนที่ 3 และ 5 องศา

#### 6.1 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลน

สำหรับผลการทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลน จะแสดงอยู่ในรูปแบบของการทำงานของไซโคลนที่สามารถดักจับอนุภาคที่สถานะต่างๆ ซึ่งข้อมูลการทดลองที่สามารถเก็บได้ คือ ปริมาณของชีวมวลผงที่ทางเข้าของไซโคลน และปริมาณของชีวมวลผงที่ทางออกด้านล่างของไซโคลน จากนั้นนำมาวิเคราะห์โดยทำตามขั้นตอนในบทที่ 4 ของหัวข้อที่ 4.2.3 ในการทดลองจะกำหนดความเร็วที่ทางเข้าของไซโคลนไว้ที่ 8 และ 10 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาทีไซโคลนมีประสิทธิภาพต่างกัน ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที

อนุภาคขนาดเล็กสุด ( $\mu\text{m}$ )	อนุภาคขนาดใหญ่สุด ( $\mu\text{m}$ )	ขนาดเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	% โดยน้ำหนัก , $f_i$	$d_{pc}/d_{pj}$	$n_j$
0	74	37.00	18.46	0.240	0.945
75	149	112.00	7.40	0.079	0.994
150	179	164.50	7.77	0.054	0.997
180	299	239.50	17.67	0.037	0.999
300	354	327.00	10.67	0.027	0.999
355	424	389.50	11.44	0.023	0.999
425	500	462.50	26.56	0.019	1.000
ประสิทธิภาพไซโคลน				97.78	

จากการคำนวณหาประสิทธิภาพของไซโคลน จะได้ขนาดตัดของอนุภาค (Cut Size Diameter)

เท่ากับ 7.40 ไมครอน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที

อนุภาคขนาด เล็กสุด ( $\mu\text{m}$ )	อนุภาคขนาด ใหญ่สุด ( $\mu\text{m}$ )	ขนาดเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	% โดย น้ำหนัก , $f_i$	$d_{pc}/d_{pj}$	$n_j$
0	74	37	16.86	0.093	0.991
75	149	112	16.98	0.031	0.999
150	179	164.5	12.79	0.021	1.000
180	299	239.5	17.88	0.016	1.000
300	354	327	7.05	0.013	1.000
355	424	389.5	6.19	0.010	1.000
425	500	462.5	22.22	0.007	1.000
<b>ประสิทธิภาพไซโคลน</b>					99.10

จากการคำนวณหาประสิทธิภาพของไซโคลนจะได้ขนาดตัดของอนุภาค เท่ากับ 6.76 ไมครอน

ทั้งนี้ได้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาประสิทธิภาพการคัดแยกเมื่อปล่อยชีวมวลที่มีขนาด 7.40 และ 6.76 ไมครอน เข้าสู่ไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาทีดังตารางที่ 6.3

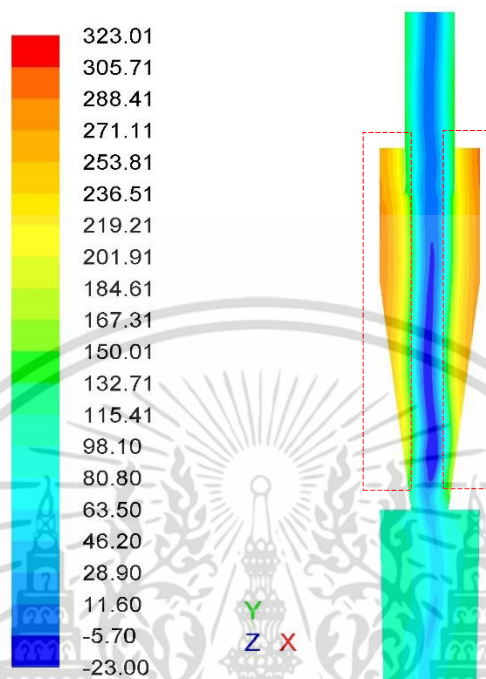
ตารางที่ 6.3 ประสิทธิภาพไซโคลนของชีวมวลขนาด 7.40 และ 6.76 ไมครอน ที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

ความเร็วทางเข้า (เมตรต่อวินาที)	ขนาดตัด อนุภาค (ไมครอน)	Track	Escape	Trap	Incom plete	ประสิทธิภาพ
8	7.40	250	76	78	68	42.8%
10	6.76	250	116	89	45	43.4%

## 6.2 วิจารณ์ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

การทดสอบหาประสิทธิภาพไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดตัดของอนุภาค (cut size diameter) มีขนาดเล็กลง กล่าวคือขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัดอนุภาคจะมีโอกาสหลุดออกทางออกด้านล่างไซโคลนมากกว่า 50% เมื่ออากาศเข้าสู่ไซโคลนจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนไปตามผนังไซโคลน ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขึ้นและเกิดการบีบอัดที่ผนังไซโคลนทำให้ความดันสูงกว่าบริเวณแกนกลาง (ดังแสดงในรูปที่ 6.1) จากการจำลองพบว่าองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกนที่ระนาบ 1, 2 และ 3 (ดังรูปที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4, 6.6 และ 6.8) ที่บริเวณใกล้กับผนังไซโคลนมีค่าเป็นลบ บ่งชี้ถึงการไหลพุ่งลงสู่ด้านล่าง ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ชีวมวลผงขนาดใหญ่ที่ลอยอยู่ในบริเวณใกล้ผนัง ตกลงสู่ทางออกด้านล่างของไซโคลน



รูปที่ 6.1 ความดันสถิต (Pascal) ภายในไซโคลน ที่ ระนาบ  $z=0$

### 6.3 การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลน

แบบจำลองการไหลของแก๊สและของแข็งในไซโคลนที่ใช้กับระบบชีวมวลผง สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นได้เพียงใดนั้น จะต้องนำผลจากการจำลองที่ภาวะเดียวกันไปวิเคราะห์เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลองของงานวิจัย Shukla และคณะ [10] ในส่วนแรกของการจำลองเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้ จะพิจารณาผลขององค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส และองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกนของไซโคลน ที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

#### 6.3.1 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

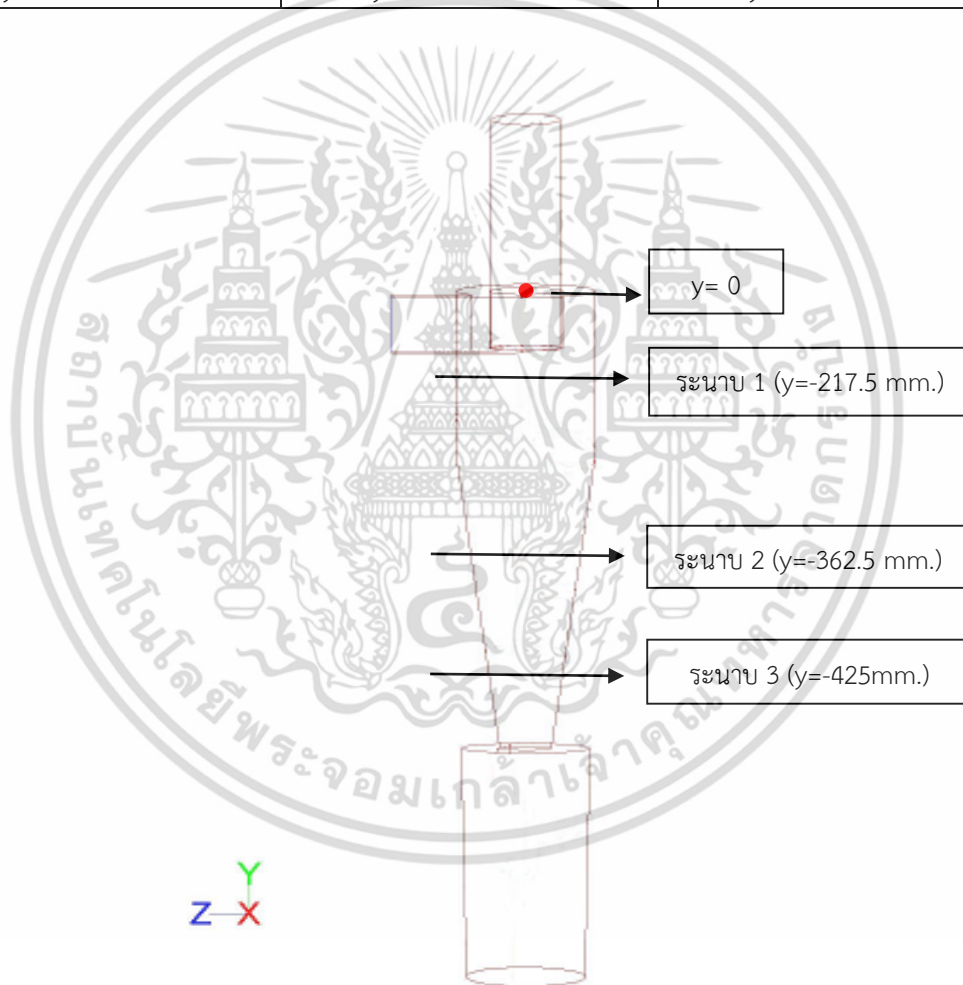
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสนามการไหลในไซโคลน โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยด้วย เพื่อใช้ทำนายองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกนและองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสในไซโคลน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลน ในแบบจำลองเชิงตัวเลขจะเลือกใช้แนวคิดแบบออยเลอร์เลียน และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในการจำลองการไหล เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหล ทั้งนี้เงื่อนไขที่ใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข จะได้จากผลของความเร็วอากาศที่ทางเข้าของไซโคลน จากเงื่อนไขการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองในตารางที่ 6.1 และ 6.2 รูปแบบการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการจำลองเชิงตัวเลขของการไหล จะกำหนดดังแสดงในบทที่ 5 ตารางที่ 5.1 และ 5.2

ในการตรวจสอบสนามการไหลของไซโคลน จะพิจารณาจากองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกนที่อยู่ภายในไซโคลนที่ตำแหน่งต่างๆตามเส้นแกนกลางของไซโคลน ( $r/R = -1.0 - 1.0$ ) ที่ระนาบ 1, 2 และ 3 โดยระบุตำแหน่งของระนาบไว้ ตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ตำแหน่งที่แบ่งระนาบของไซโคลน

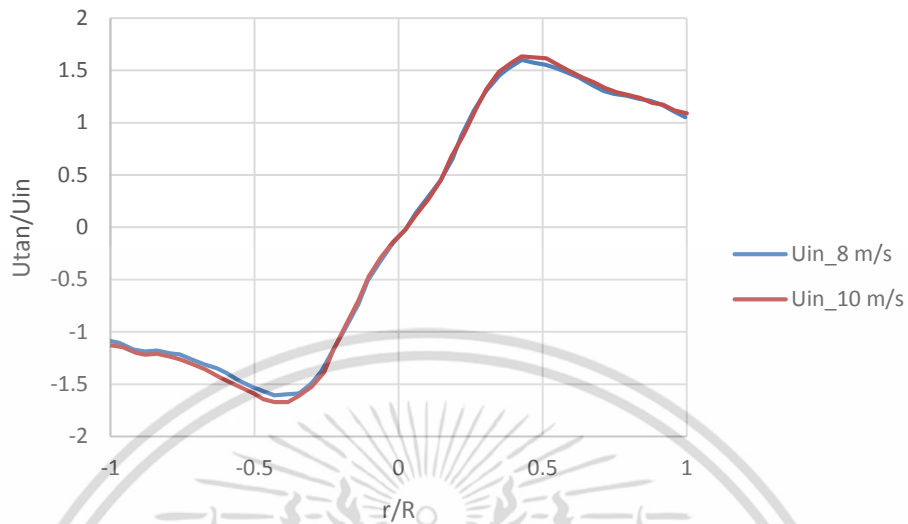
ระนาบ 1	ระนาบ 2	ระนาบ 3
0.75D	1.25D	1.75D
$y = -217.5$ (mm.)	$y = -362.5$ (mm.)	$y = -425.5$ (mm.)



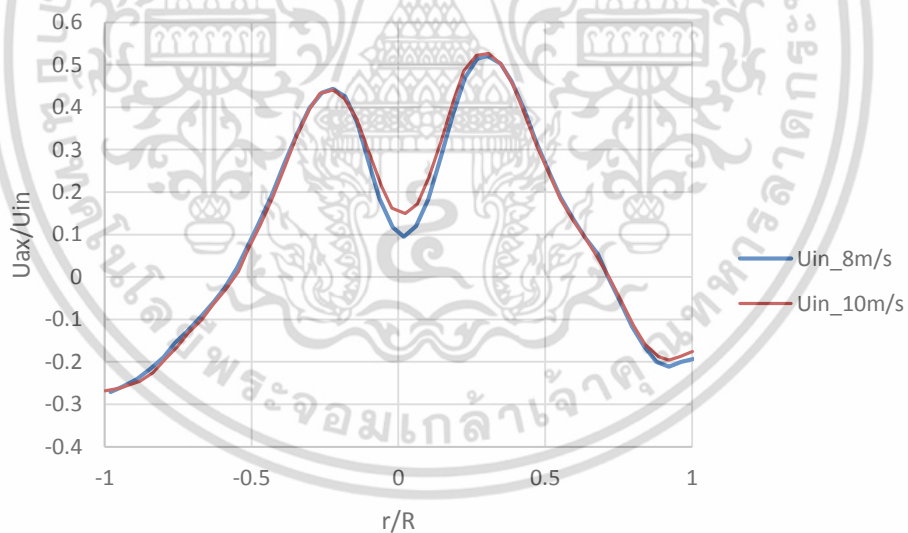
รูปที่ 6.2 ไซโคลนระนาบที่ 1,2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.1.1 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกน พิจารณาตามเส้นระนาบที่ 1



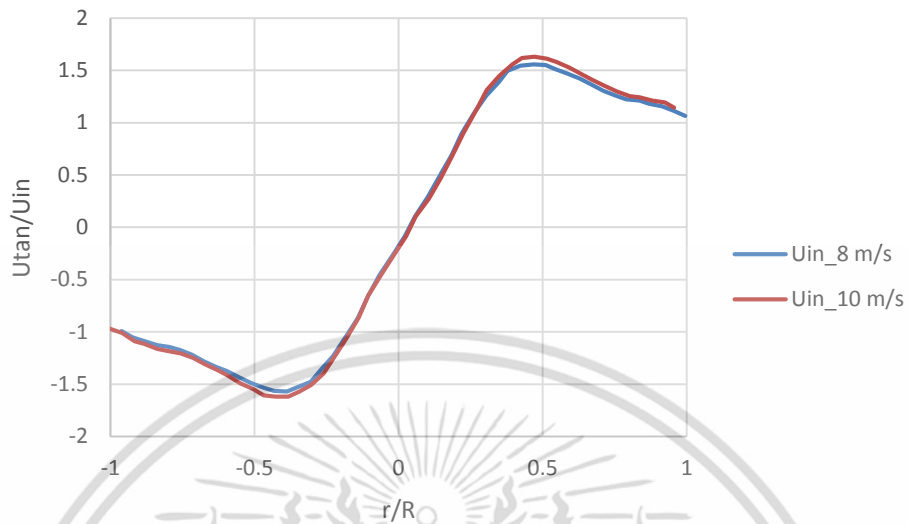
รูปที่ 6.3 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสระนาบที่ 1 ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที



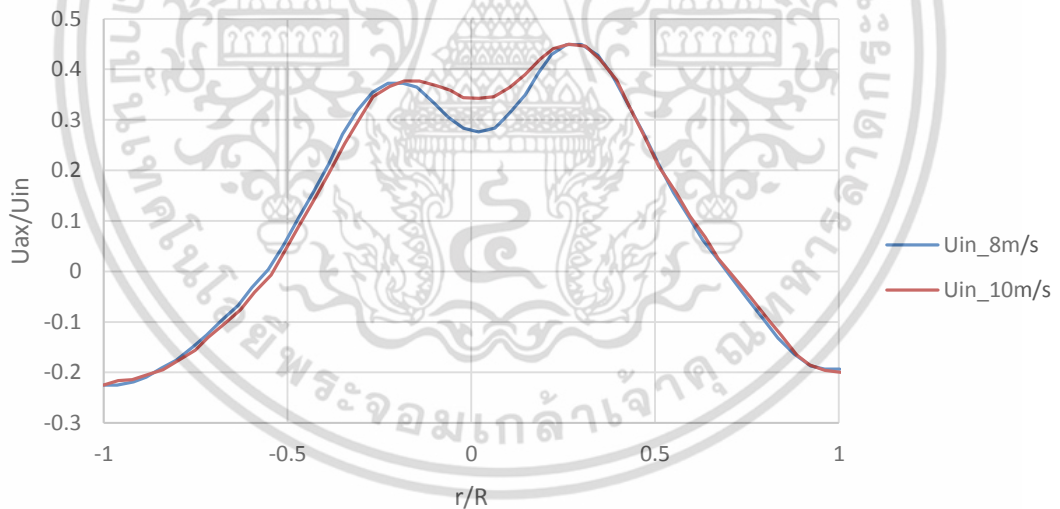
รูปที่ 6.4 ความเร็วในทิศทางตามแนวแกนระนาบที่ 1 ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกน พิจารณาตามเส้นระนาบที่ 2

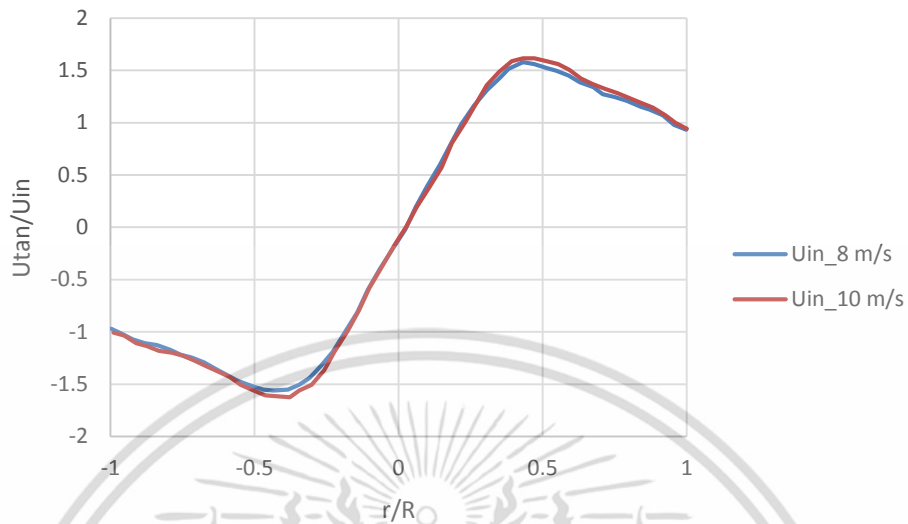


รูปที่ 6.5 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสระนาบที่ 2 ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

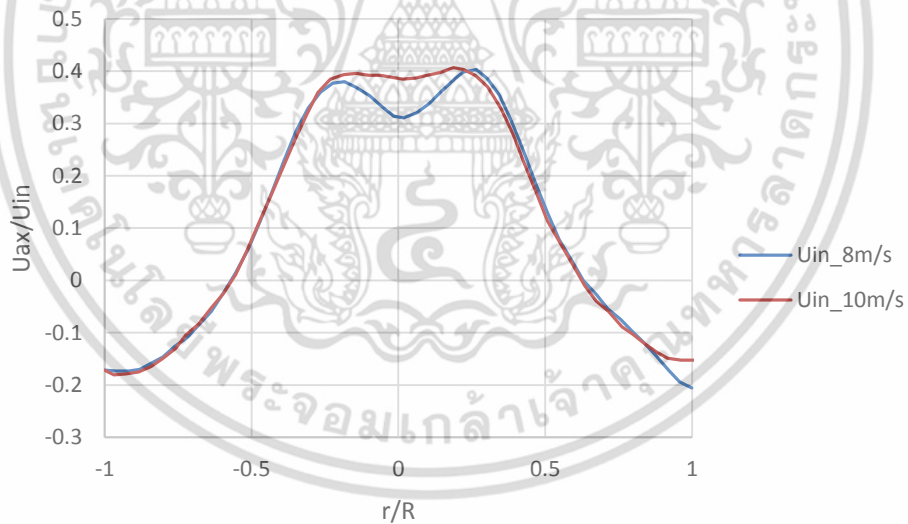


รูปที่ 6.6 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสระนาบที่ 2 ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

### 6.3.1.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกน พิจารณาตามเส้นระนาบที่ 3



รูปที่ 6.7 ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสระนาบที่ 3 ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 6.8 ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสระนาบที่ 3 ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

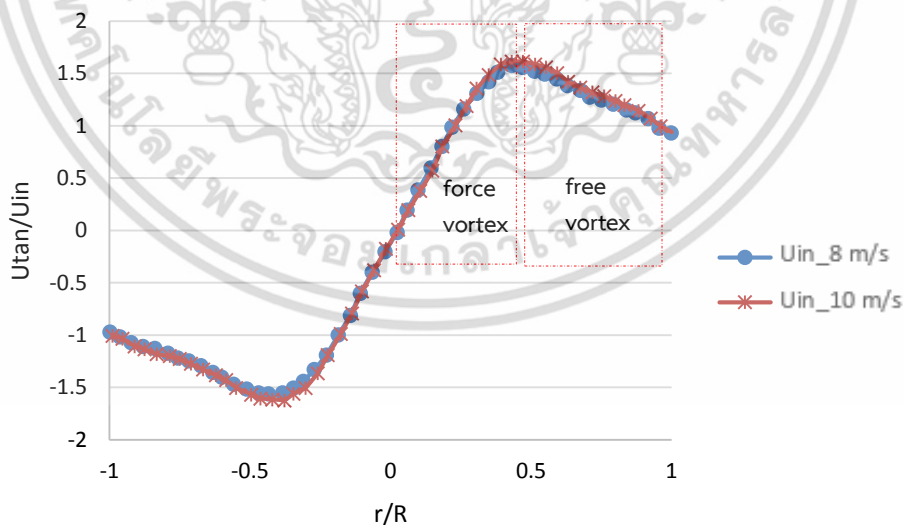
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.2 วิจารณ์ผลการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

ในการจำลองการไหลนี้จะทำการพิจารณาองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกน ทั้ง 3 ระนาบ โดยกำหนดตำแหน่งไว้ดังรูปที่ 6.1 และแสดงค่าดังตารางที่ 5.3

#### 6.3.2.1 วิจารณ์ผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขของสนามการไหลในไซโคลนซึ่งได้พิจารณา 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและเส้นทางเดินอนุภาคในไซโคลน ได้แก่ ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสโดยสังเกตทั้ง 3 ระนาบ พบว่าค่าสูงสุดของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสจะเท่ากับ 1.5 เท่าของความเร็วทางเข้า ดังนั้นหากความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสประกอบด้วยการไหล 2 แบบ ที่บริเวณ  $r/R = 0$  ถึง 0.5 จะเป็นกระแสการไหลที่หมุนแบบ forced vortex คือ ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของรัศมีที่เพิ่มขึ้น ที่  $r/R$  ประมาณ 0.5 จะมีความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสมากที่สุดเท่ากับ 1.5 เท่าของความเร็วทางเข้า จากนั้นกระแสการไหลจะเปลี่ยนเป็นการหมุนแบบ free vortex คือ ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสจะลดลงตามความยาวของรัศมีที่เพิ่มขึ้น โดยเกิดขึ้นตั้งแต่  $r/R = 0.5$  ถึง 1.0 ทั้งนี้ ในช่วง  $r/R = 0$  ถึง -1 มีโปรไฟล์ของความเร็วคล้ายกันกับช่วง ตั้งแต่  $r/R = 0$  ถึง 1 แต่มีทิศทางตรงข้าม โดยมีความเบี่ยงเบนเล็กน้อยเนื่องจากอิทธิพลของทางเข้า



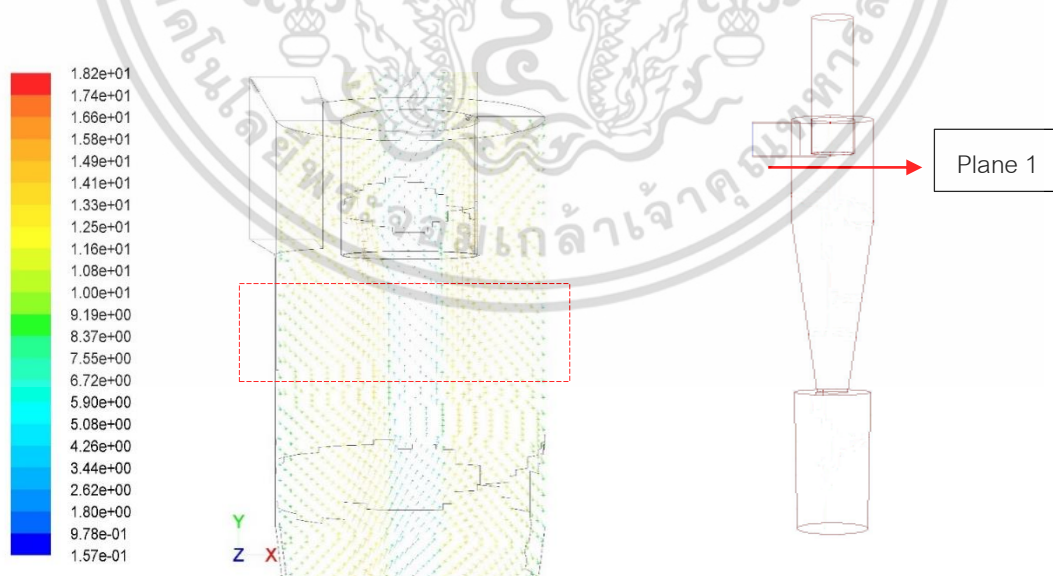
รูปที่ 6.9 แสดง force vortex และ free vortex ของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส

บริเวณ forced vortex ตำแหน่ง  $r/R = -0.25$  ถึง  $0.25$  ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วทางเข้าของไซโคลน จากการเปรียบเทียบความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ 1, 2 และ 3 พบว่าความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.5 และ -1.5 เท่าของความเร็วทางเข้า มีการกระจายตัวที่เหมือนกัน

อนึ่ง ในการจำลองการไหลสำหรับกรณีศึกษา นี้ ได้กำหนดความเร็วที่ทางเข้าไซโคลนให้มีความสม่ำเสมอ (uniform) เท่านั้น

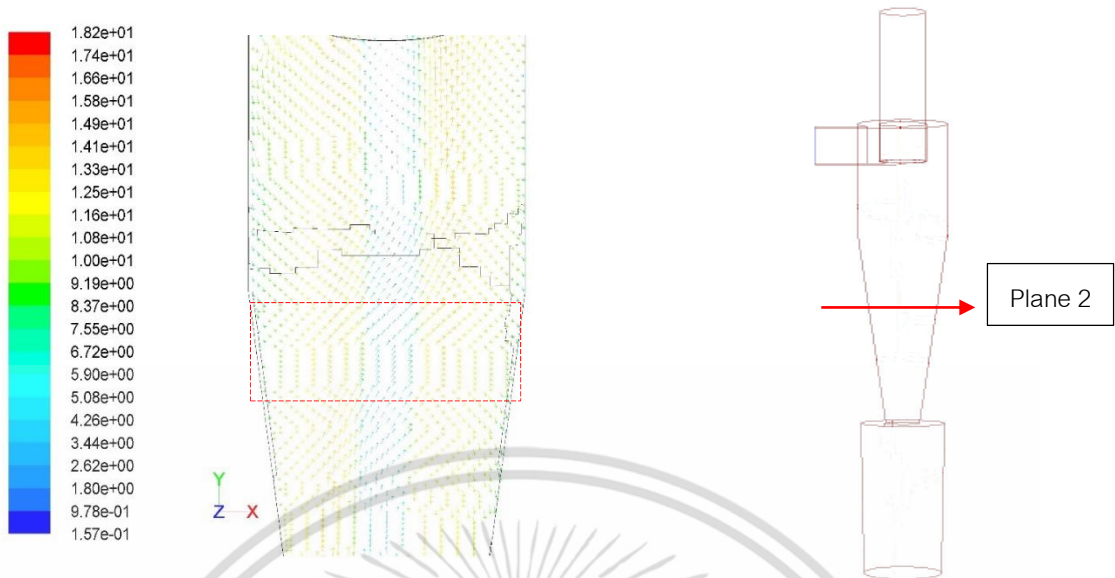
### 6.3.2.2 วิจัยผลลัพธ์การจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วตามแนวแกนในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

จากการกระจายตัวของความเร็วในทิศทางตามแนวแกนที่ระนาบ 1, 2 และ 3 บ่งชี้ถึงลักษณะของกระแสอากาศหมุนวนด้านในที่เกิดจากการไหลย้อนขึ้นสู่ทางออกด้านบน (reverse flow) และการไหลพุ่งลงที่ผิวผนังของไซโคลน โดยมีทิศทางของการไหล 2 ทิศทางคือ จากรูปที่ 6.4 ช่วง  $0.75 < r/R < 0.75$  มีทิศทางพุ่งขึ้น และมีทิศทางพุ่งลงในช่วง  $r/R < -0.75$  และ  $r/R > 0.75$  มีการกระจายตัวของความเร็วในทิศทางตามแนวแกนเป็นรูปตัว M โดยอัตราส่วนของ  $U_{ax}/U_{in}$  มีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง  $r/R$  เท่ากับ  $-0.25$  และ  $0.25$  การไหลบริเวณนี้จะมีทิศทางพุ่งขึ้น ในขณะที่ความเร็วในทิศทางตามแนวแกนมีค่าติดลบที่ตำแหน่ง  $r/R$  เท่ากับ  $-0.5$  ถึง  $-1$  และ  $0.5$  ถึง  $1$  การไหลจะมีทิศทางพุ่งลงแสดงดังรูปที่ 6.9, 6.10 และ 6.11 จากการเปรียบเทียบที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที พบว่าที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที ตำแหน่ง  $r/R = -0.6$  ถึง  $-1$  และ  $0.6$  ถึง  $1$  มีความเร็วในทิศทางตามแนวแกนติดลบน้อยกว่าที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณา ลักษณะขององค์ประกอบความเร็วที่ได้จากการจำลองกับผลของการทดลองที่ความเร็วทางเข้าเดียวกัน พบว่าความเร็วในแนวแกนที่ติดลบมากขึ้นนี้จะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของไซโคลนที่เพิ่มมากขึ้น

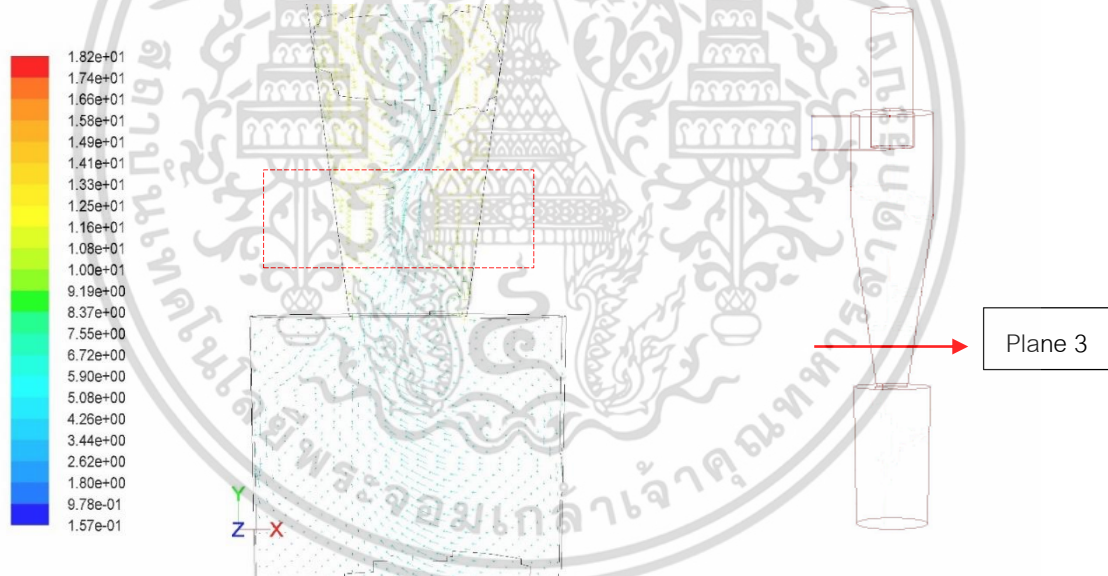


รูปที่ 6.10 เวกเตอร์ความเร็วในไซโคลนที่ตำแหน่งระนาบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 เวกเตอร์ความเร็วในไซโคลนที่ตำแหน่งระนาบที่ 2



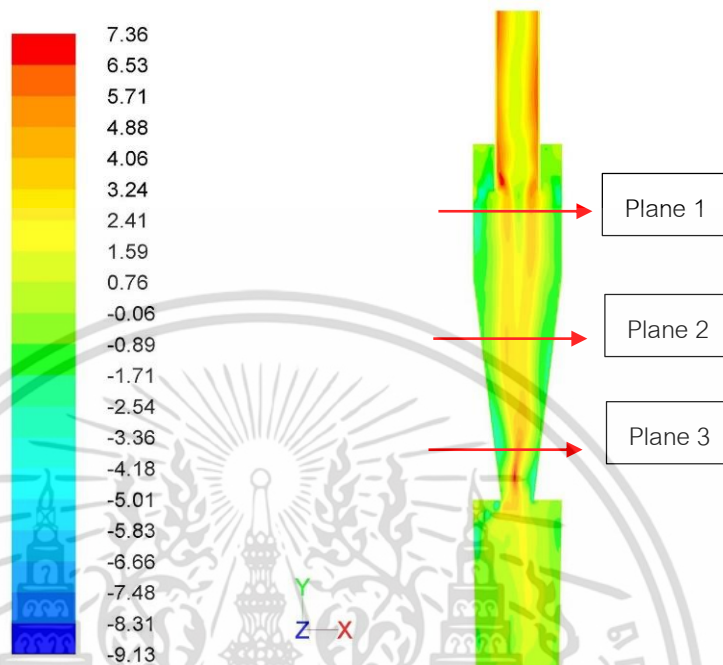
รูปที่ 6.12 เวกเตอร์ความเร็วในไซโคลนที่ตำแหน่งระนาบที่ 3

จากการเปรียบเทียบความเร็วในทิศทางตามแนวแกน ในระนาบที่ 1 ของกรณีความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที ที่  $r/R = -0.25$  มีอัตราส่วน  $U_{ax}/U_{in}$  สูงสุดเท่ากับ 4.5 เท่าของความเร็วทางเข้า หากแต่ที่  $r/R = 0$  ความเร็วแนวแกนลดลงเท่ากับ 1.5 เท่าของความเร็วทางเข้า เนื่องจากอากาศที่บริเวณนี้จะเลี้ยวเบนหมุนวนรอบท่อทางออก (vortex finder) ทำให้อากาศเกิดการอัดตัว จึงมีความเร็วสูงขึ้นที่ผนังท่อทางออก โดยที่แกนกลางความเร็วจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6.8 และรูปที่

6.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ที่  $r/R = 0.25$  พบว่า มีความเร็วสูงขึ้นถึงประมาณ 5.25 เท่าของความเร็วทางเข้า เนื่องจากอากาศที่ทางเข้าจะเลี้ยวเบนมาอัดตัวเพิ่มมากขึ้น จึงมีความเร็วสูงมากกว่าที่  $r/R = -0.25$  เพราะอิทธิพลของทางเข้า

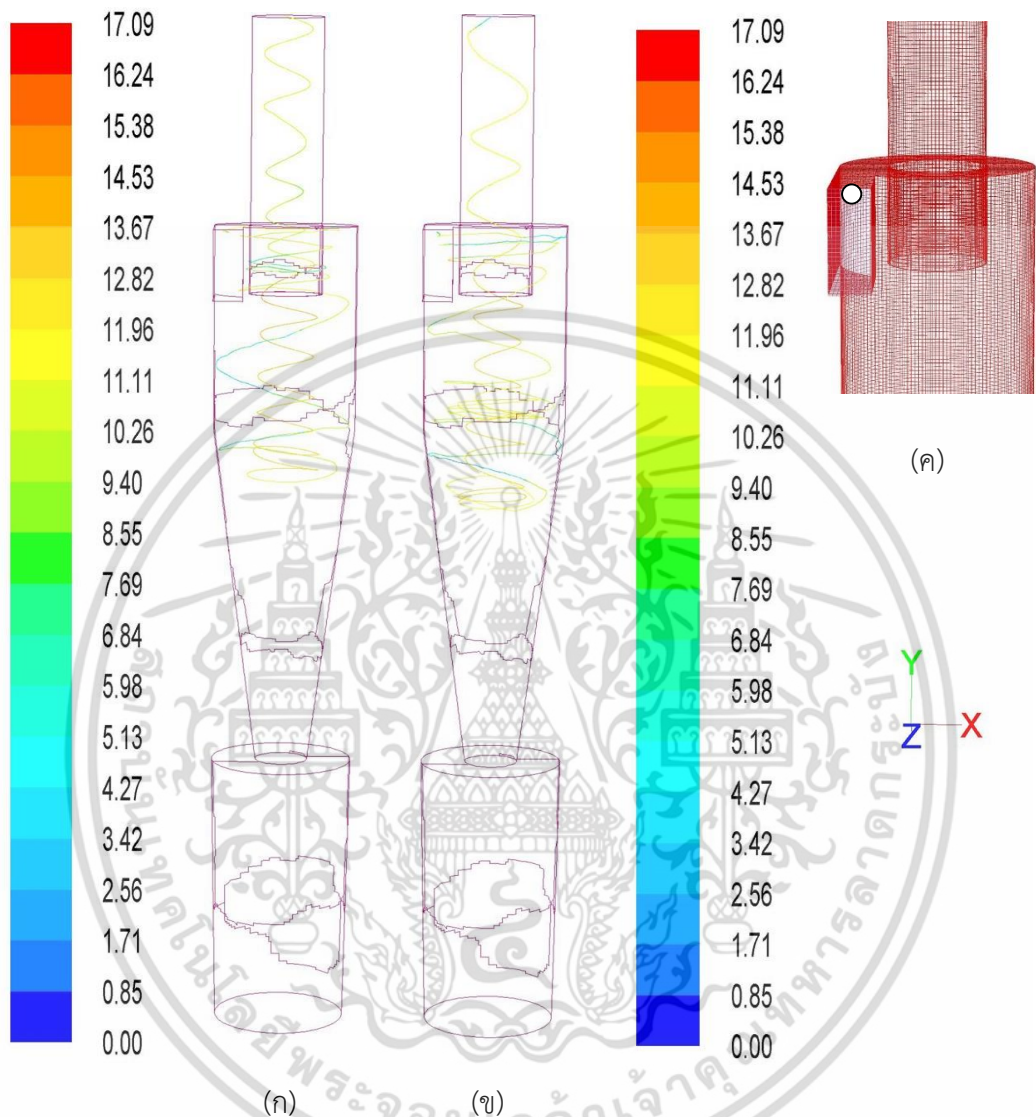


รูปที่ 6.13 ความเร็วในไซโคลน (m/s)

ระนาบที่ 2 และ 3 อยู่ห่างจากท่อทางออกด้านบน มวลอากาศบางส่วนได้ไหลออกไปจากโดเมนการไหลที่ทางออกด้านบนแล้ว การเลี้ยวเบนของมวลอากาศที่เหลืออยู่ในระนาบเหล่านี้ จึงทำให้การอัดตัวของมวลอากาศลดลงตามลำดับ โดยที่แกนกลางมีความเร็วลดลงเล็กน้อยตามลำดับเช่นกัน

สำหรับลักษณะการกระจายความเร็วในแนวแกนของกรณีไซโคลนทำงานที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที พบว่า มีการกระจายความเร็วที่  $r/R = -0.25$  , 0 และ 0.25 ต่ำกว่าที่ความเร็ว 10 เมตรวินาที แต่มีลักษณะของการกระจายความเร็วคล้ายกัน ทั้ง 3 ระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 6.4, 6.6 และ 6.8

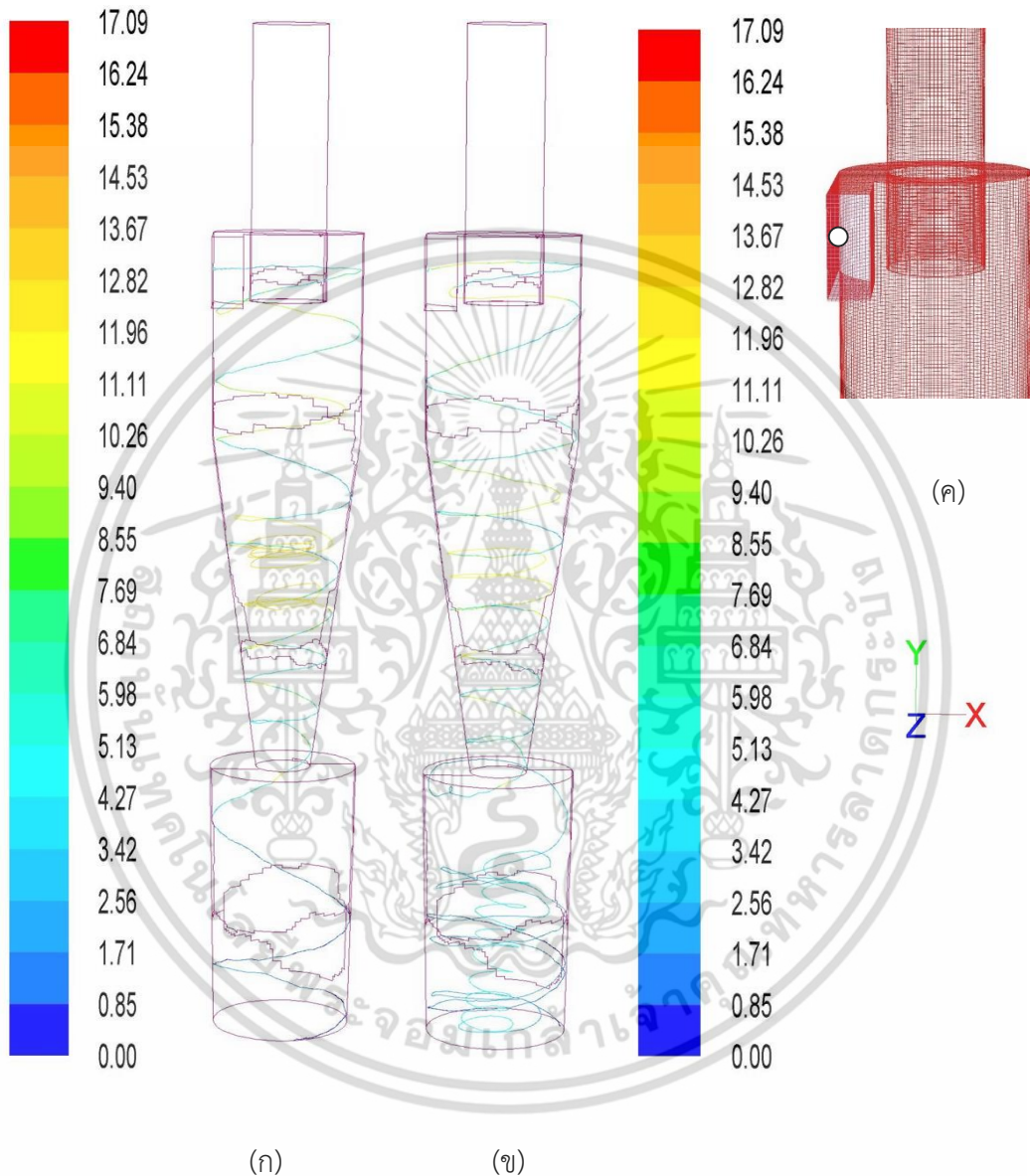
## 6.4 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอน ที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 6.14 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านบน (ก) เส้นทางเดินของชีวมวลผง (m/s) (ข) เส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

จากรูปที่ 6.14 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางเดินหมุนวนรอบท่อทางออกด้านบน จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังกระแสน้ำวนนอกเกิดการณ์ชนผนังกระบอกไซโคลนบริเวณรอยต่อทรงกระบอกกับส่วนทรงกรวยที่กรวยไซโคลนนี้เองจะสังเกตเห็นชีวมวลผงกระดอนกลับเข้าสู่กระแสน้ำวนนอกด้านใน ซึ่งมีทิศของความเร็วในแนวแกนเป็นบวก อนุภาคจึงโคจรเป็นเกลียวพุ่งขึ้น และเดินทางจนหลุดออกสู่ทางออกด้านบน โดยแถบสีที่มีหมายเลขกำกับแสดงย่านความเร็วของอนุภาค(m/s) พบว่าเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่มีรัศมีการหมุนแคบจะสัมพันธ์กับความเร็วที่มากขึ้น อันเป็นไปตามสนามความเร็วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

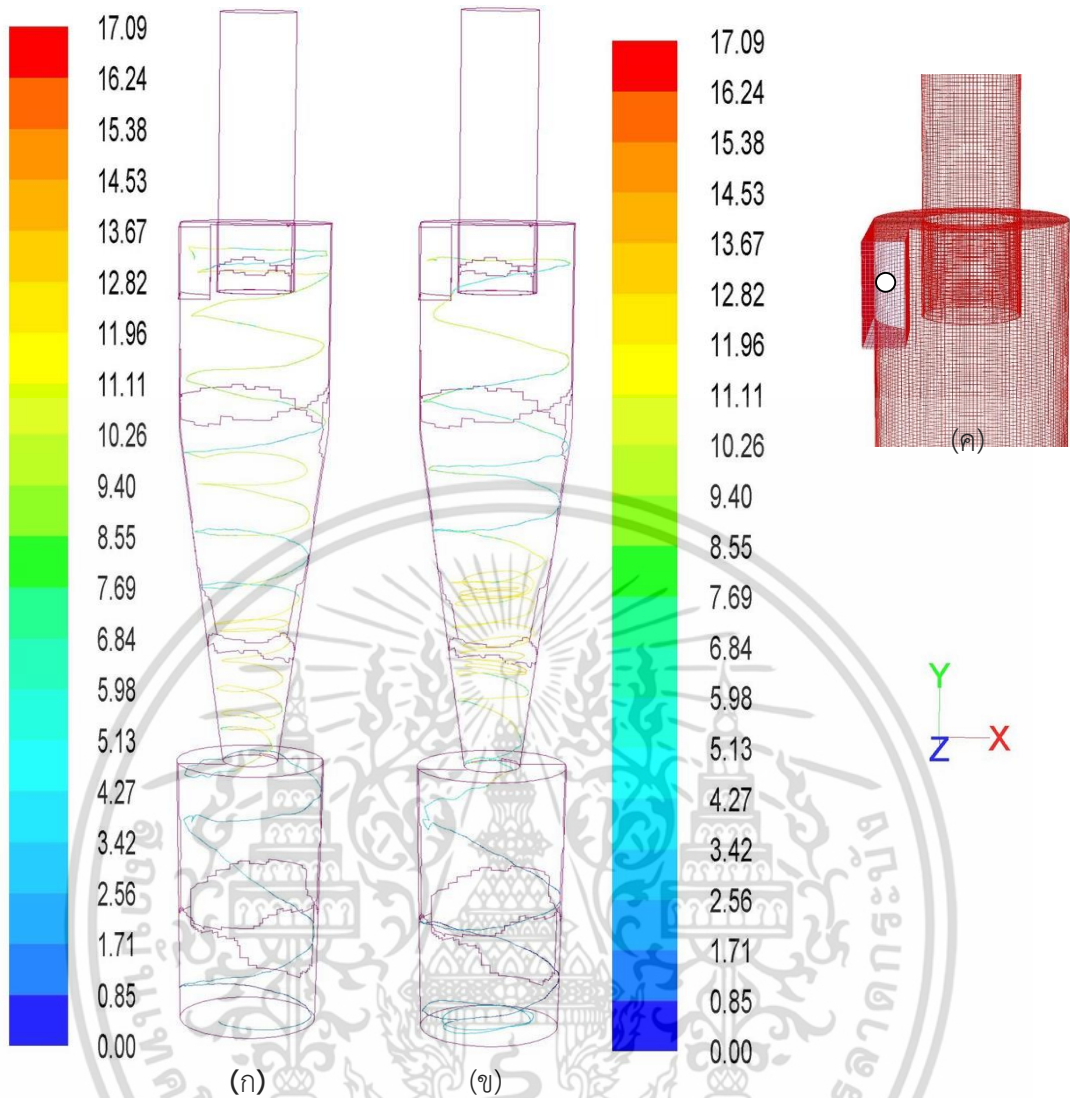
ที่อนุภาคนั้นล่องลอยอยู่ ส่งผลให้ชีวมวลผงที่ตำแหน่งดังกล่าวมีความเร็วมากกว่าที่ตำแหน่งใกล้เคียง เมื่ออนุภาคเดินทางใกล้แกนกลางของไซโคลอน จะได้รับอิทธิพลของความเร็วในแนวแกนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วในแนวเส้นรอบวงน้อยลง จึงสังเกตเห็นเส้นทางเดินที่หมุนเป็นเกลียวขึ้นสู่ทางออกของไซโคลอน โดยที่ขนาดของความเร็วอนุภาคไม่ได้ลดลง



รูปที่ 6.15 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านซ้าย (ก) เส้นทางเดินของชีวมวลผง (m/s) (ข) เส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

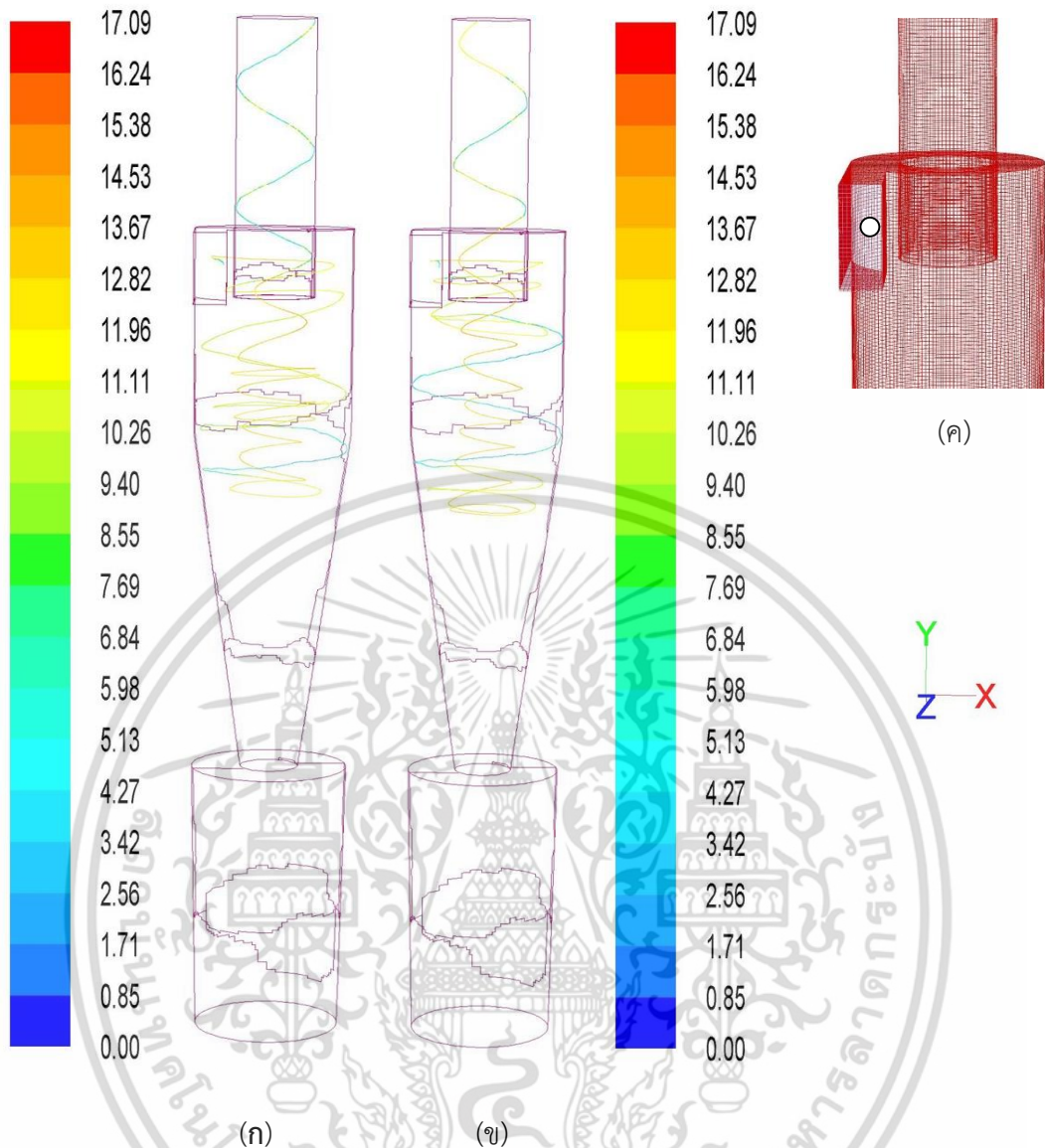
จากรูปที่ 6.15 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลอนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางเดินหมุนวนรอบท่อทางออกด้านบน จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังกระแสอากาศหมุนวนด้านนอกเกิดการชนผนังมีทิศพุ่งลงทำให้ชีวมวลผงตกลงสู่ทางออกด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



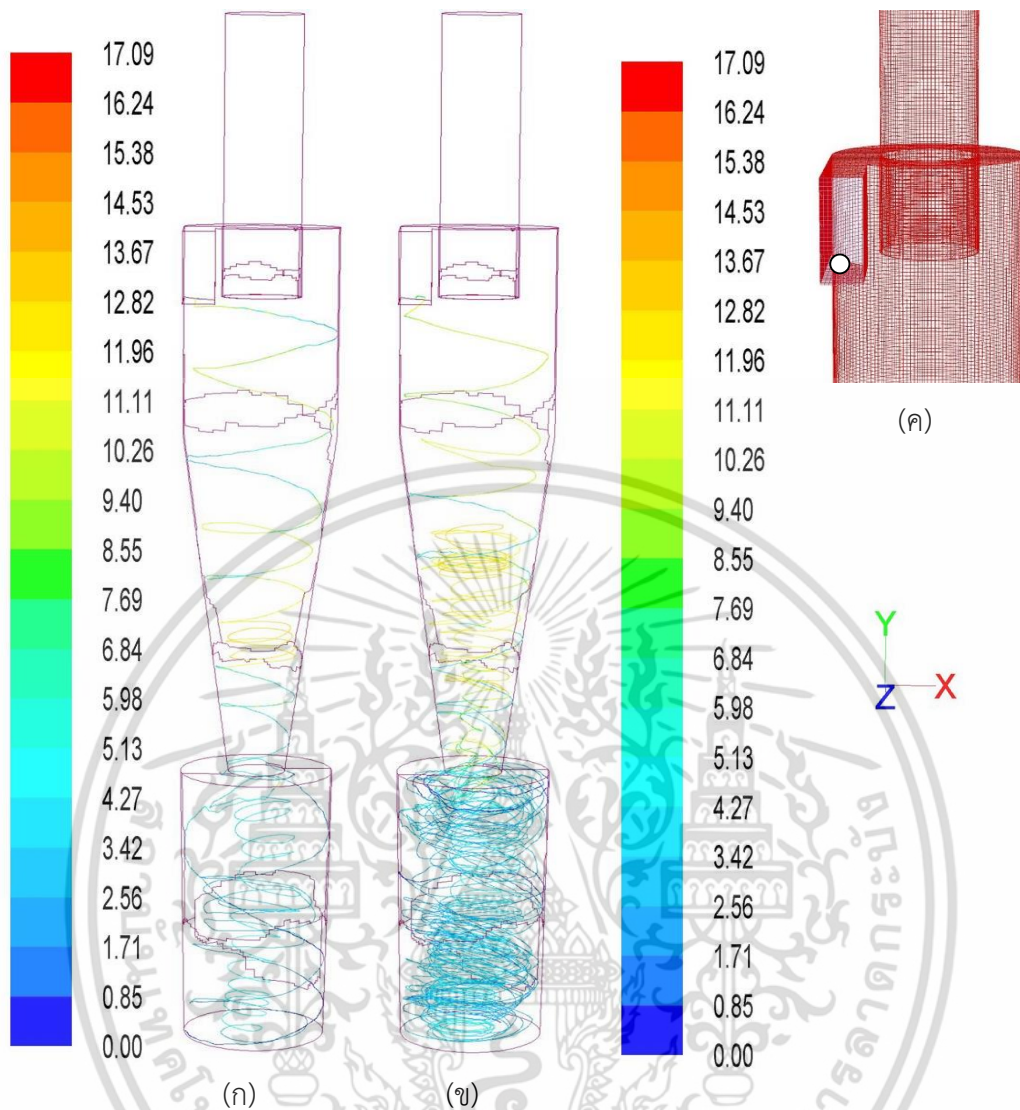
รูปที่ 6.16 ผลการจำลองเส้นทางการเดินชีวมวลขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (ก) ความเร็วของชีวมวล (m/s) (ข) ความเร็วของชีวมวลที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวล

จากรูปที่ 6.16 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางการหมุนวนรอบท่อทางออกไซโคลนด้านบนอยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านบนนอกซึ่งมีทิศทางพุ่งลงเกิดการชนผนัง ทำให้ตกลงสู่ทางออกด้านล่างและหมุนวนในถังเก็บชีวมวล



รูปที่ 6.17 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้าไซโคลนเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยอนุภาคให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านขวา (ก) ความเร็วของชีวมวลผง (m/s) (ข) ความเร็วของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

จากรูปที่ 6.17 เมื่อทดลองปล่อยอนุภาคเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าอนุภาคจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางเดินหมุนวนรอบท่อทางออกด้านบน เคลื่อนที่อยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านนอกเกิดการชนผนังกระบอกไซโคลน ที่กรวยไซโคลนชีวมวลผงกระดอนกลับเข้าสู่กระแสน้ำวนด้านในซึ่งมีทิศพุ่งขึ้น หลุดออกสู่ทางออกด้านบน



รูปที่ 6.18 ผลการจำลองเส้นทางการเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านล่าง (ก) เส้นทางการเดินของชีวมวลผง(m/s) (ข) เส้นทางการเดินความเร็วของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

จากรูปที่ 6.18 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางการหมุนวนที่กระแสาอากาศหมุนวนด้านนอกเกิดการชนผนังตกลงสู่ทางออกด้านล่าง หมุนวนและถูกกักเก็บในถังเก็บชีวมวล

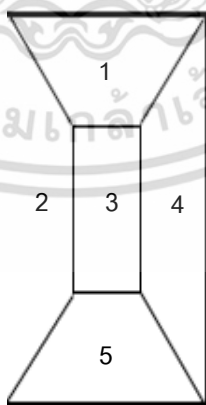
## 6.5 วิจัยผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที

### 6.5.1 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman และชีวมวลผงที่ไม่พิจารณาแรง Saffman

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเส้นทางเดินของชีวมวลผงโดยเปรียบเทียบระหว่างชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman และชีวมวลผงที่ไม่พิจารณาแรง Saffman โดยใช้การจำลองเชิงคณิตศาสตร์เนื่องจากแรง Saffman คือ แรงกระทำต่ออนุภาคที่เกิดจากอนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบหมุน และของไหลที่มีความเร็วสัมพันธ์กับอนุภาคจึงทำให้เกิดแรงนี้ขึ้น โดยทางทฤษฎีพบว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมในการเคลื่อนที่ของเส้นทางเดินอนุภาค พิจารณาในแนวดิ่งจะพบว่าเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ตกลงมาแบบเส้นตรงจะเปลี่ยนเป็นการตกแบบซิกแซก ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงของเส้นทางเดินอนุภาคนี้ทำให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพไซโคลอน โดยในการทดลองของงานวิจัย Li Xiaodong [10] พบว่าแรง Saffman จะส่งผลกระทบต่ออนุภาคที่อยู่ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 7.5 ถึง 20 ไมครอนและมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพไซโคลอน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเส้นทางเดินของชีวมวลผง (Shape Factor = 0.6) จากผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงด้วยการจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยการเลือกแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Models) พิจารณาแรง Saffman บ่งชี้ว่าไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนกับการเคลื่อนที่ของชีวมวลผงและประสิทธิภาพไซโคลอน ดังแสดงในรูปที่ 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 และ 6.18

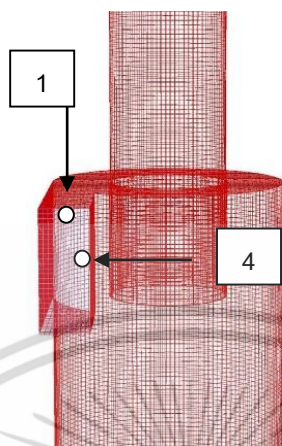
### 6.5.2 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่ถูกปล่อยตามตำแหน่งที่กำหนดบริเวณทางเข้าไซโคลอน

ในการจำลองจะทำการปล่อยชีวมวลผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.40 ไมครอน ได้มาจากการคำนวณหาประสิทธิภาพไซโคลอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที โดยจะแสดงตัวแทนตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลอนตามแนวดิ่งของทางเข้ามีความสูงต่างกันตำแหน่งที่ 1, 3 และ 5 ตามแนวนอนรัศมีจากใกล้ถึงไกลจุดกึ่งกลางไซโคลอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 ดังรูปที่ 6.19



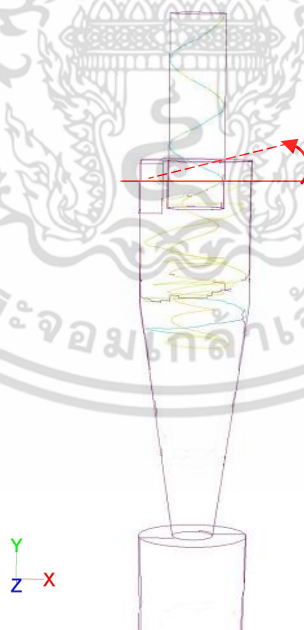
รูปที่ 6.19 ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผงที่จุดต่างๆของทางเข้า

พบว่าเมื่อกำหนดจุดปล่อยที่ทางเข้าไซโคลนต่างกันจะส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของชีวมวลผงและประสิทธิภาพไซโคลนอย่างชัดเจน จากรูป 6.20 แสดงตำแหน่งที่ชีวมวลผงมีเส้นทางเดินหมุนวนและหลุดออกไปยังทางออกด้านบน ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1 และ 4



รูปที่ 6.20 ตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินหลุดออกไปด้านบน

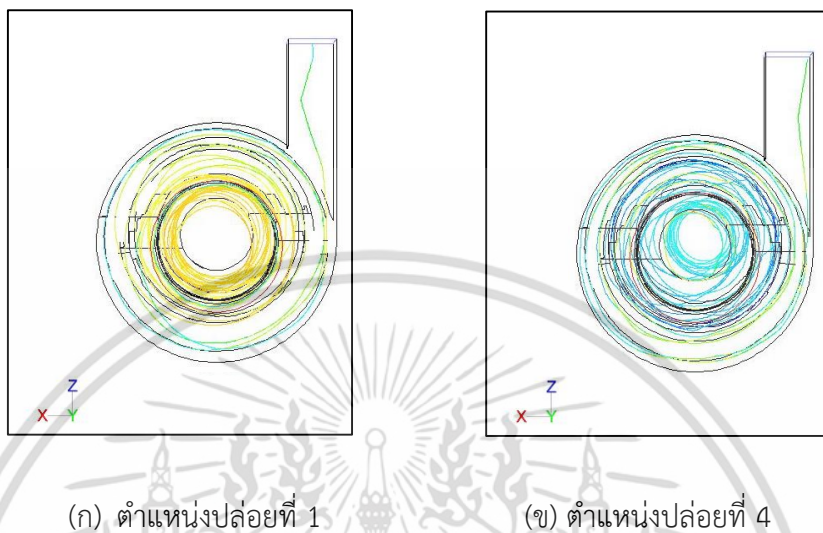
ในการจำลองกำหนดจุดปล่อยชีวมวลผงตำแหน่งที่ 1 พบว่าเมื่อเข้าสู่ไซโคลนชีวมวลผงไม่มีมุมการตก (descending angles) ดังรูปที่ 6.21 และถูกบังคับให้เลี้ยวหมุนวนรอบที่ทางออกด้านบน



รูปที่ 6.21 แสดงมุมการตกของชีวมวลผง

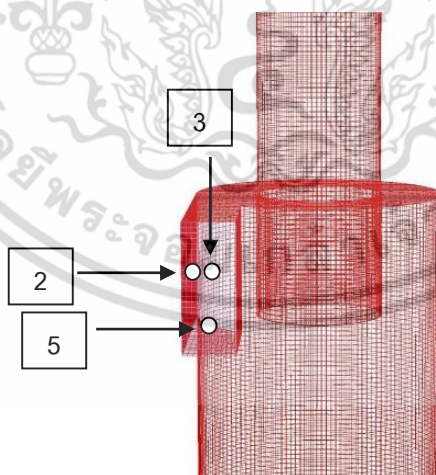
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีรัศมีในการหมุนวนแคบเมื่อถึงปลายท่อทางออกรัศมีการหมุนวนขยายกว้างขึ้นทำให้ชีวมวลผงมีการเคลื่อนที่อยู่ในกระแสนอกอากาศหมุนวนด้านนอกและเกิดการชนผนังกระบอกไซโคลนแสดงดังรูปที่ 6.22 (ก) ที่กรวยไซโคลนชีวมวลกระดอนกลับเข้าสู่กระแสนอกอากาศหมุนวนด้านในมีทิศทางพุ่งขึ้น ชีวมวลผงจึงหลุดออกสู่ทางออกด้านบน ดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.22 เส้นทางเดินชีวมวลผงรัศมีการหมุนวนแคบ (ก) ตำแหน่งปลอยที่ 1 (ข) ตำแหน่งปลอยที่ 4

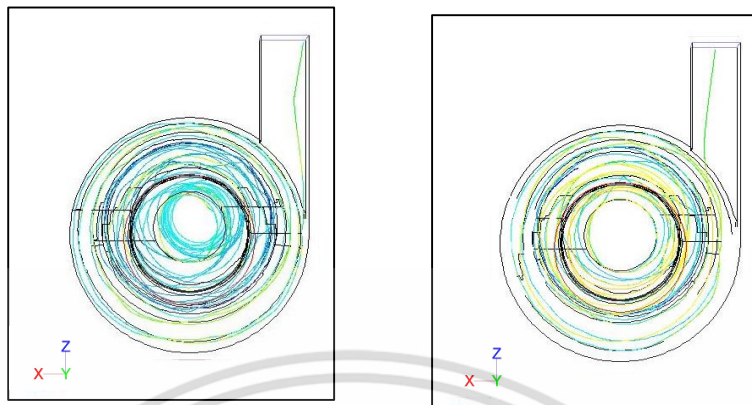
จากรูป 6.23 แสดงตำแหน่งปลอยชีวมวลผงที่มีเส้นทางเดินหมุนวนตกลงสู่ทางออกด้านล่าง ได้แก่ ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 5



รูปที่ 6.23 ตำแหน่งที่ปลอยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินตกลงด้านล่าง

จากการจำลองพบว่าที่จุด 2 และ 3 ชีวมวลผงที่ปลอยเข้าสู่ไซโคลนจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีรัศมีการหมุนวนกว้างดังรูปที่ 6.24 ทำให้เคลื่อนที่อยู่ในกระแสนอกอากาศหมุนวนด้านนอกชีวมวลผงเกิดการ

ชนผนังกระบอกไซโคลน ที่บริเวณนี้ความเร็วมีค่าติดลบจึงมีทิศทางพุ่งลงทำให้ชีวมวลผงตกลงสู่ทางออกด้านล่าง

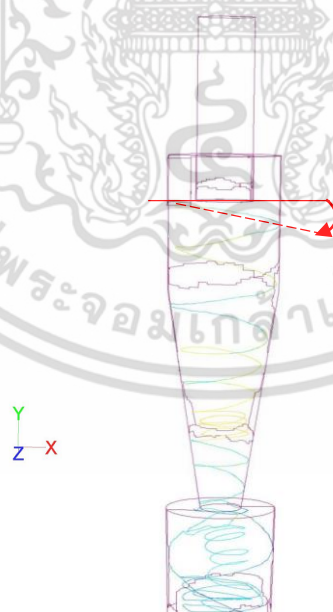


(ก) จุดปล่อยที่ 2

(ข) จุดปล่อยที่ 3

รูปที่ 6.24 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้าง (ก) จุดปล่อยที่ 2 (ข) จุดปล่อยที่ 3

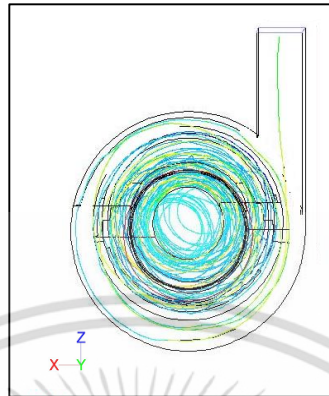
ตำแหน่งจุดปล่อยที่ 5 การจำลองกำหนดจุดปล่อยชีวมวลผงอยู่บริเวณด้านล่างของทางเข้าเมื่อเทียบกับท่อทางออกด้านบนจะอยู่ที่ส่วนปลาย เมื่อเข้าสู่ไซโคลนชีวมวลผงมีมุมการตก ดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 มุมการตกของชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

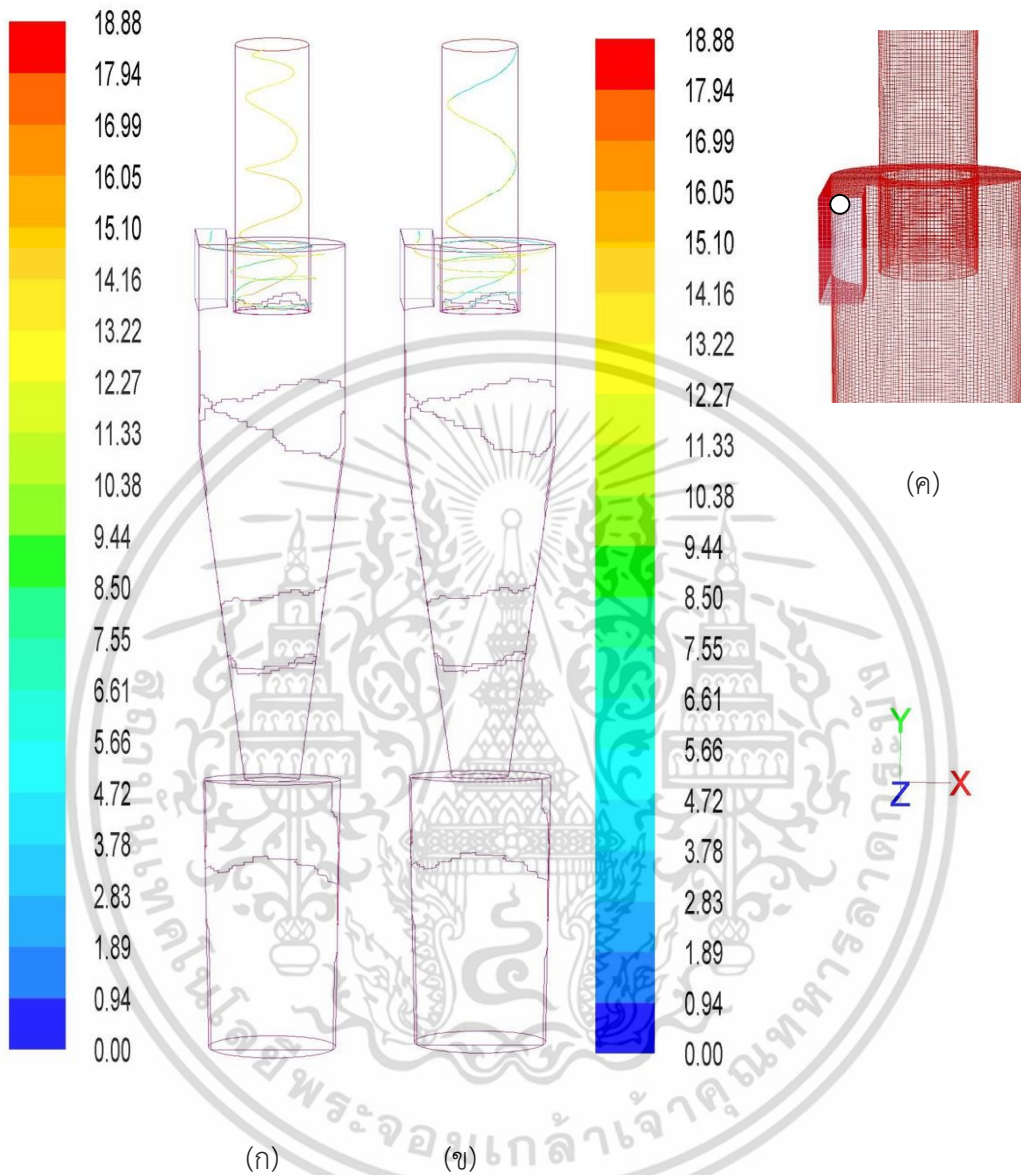
และถูกบังคับให้เลี้ยวเบนมีรัศมีการหมุนวนกว้างอยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านนอกดังรูปที่ 6.26 เกิดการชนผนังกรวยไซโคลนด้วยความเร็วมีค่าติดลบ จึงมีทิศทางพุ่งลงทำให้ชีวมวลตกลงสู่ทางออกด้านล่าง



รูปที่ 6.26 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้าง จุดปล่อยที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

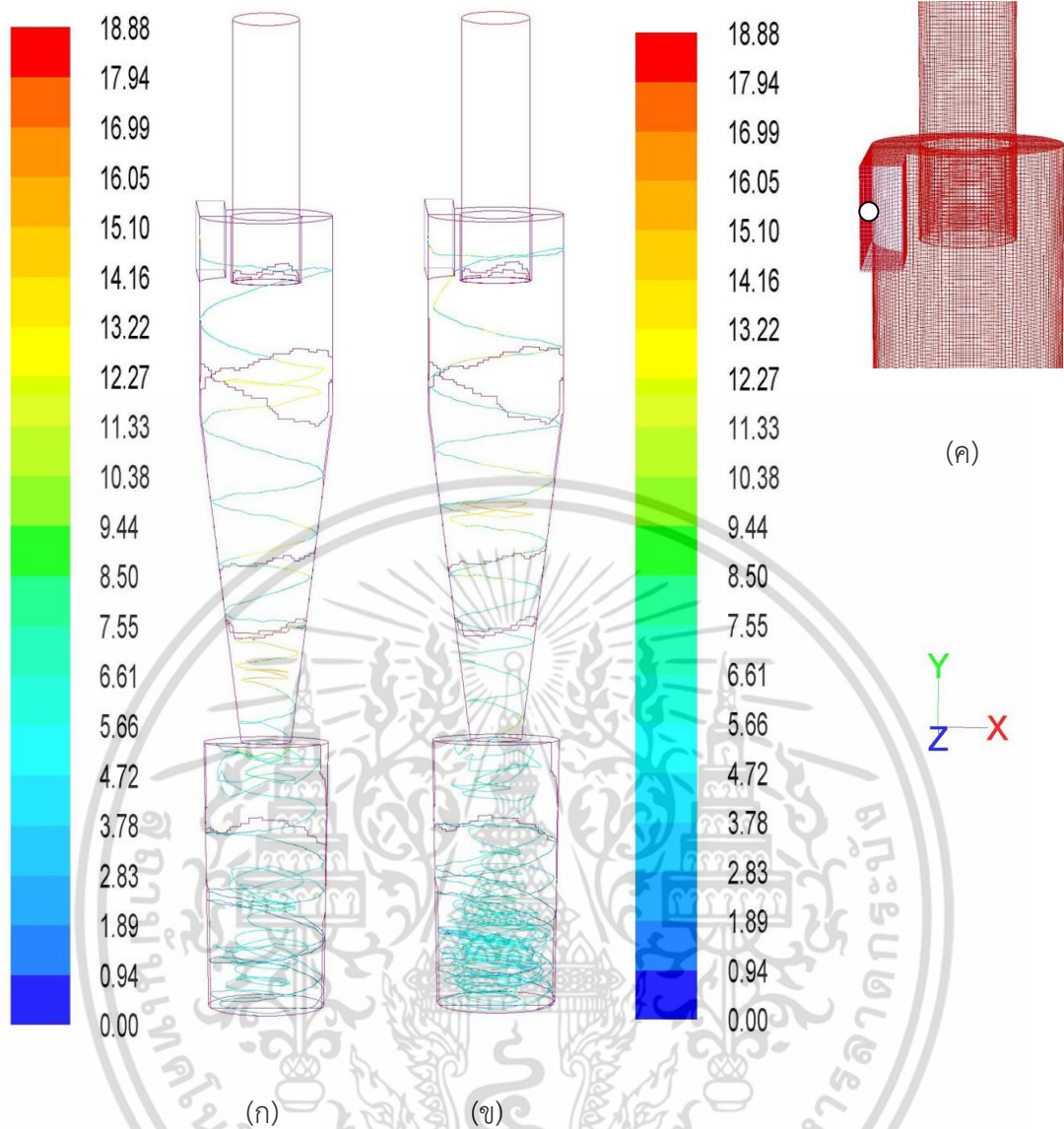
6.6 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอน ที่ความเร็วทางเข้าไซโคลนเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 6.27 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยอนุภาคให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านบน (ก) เส้นทางเดินของชีวมวลผง(m/s) (ข) เส้นทางเดินของชีวมวลที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

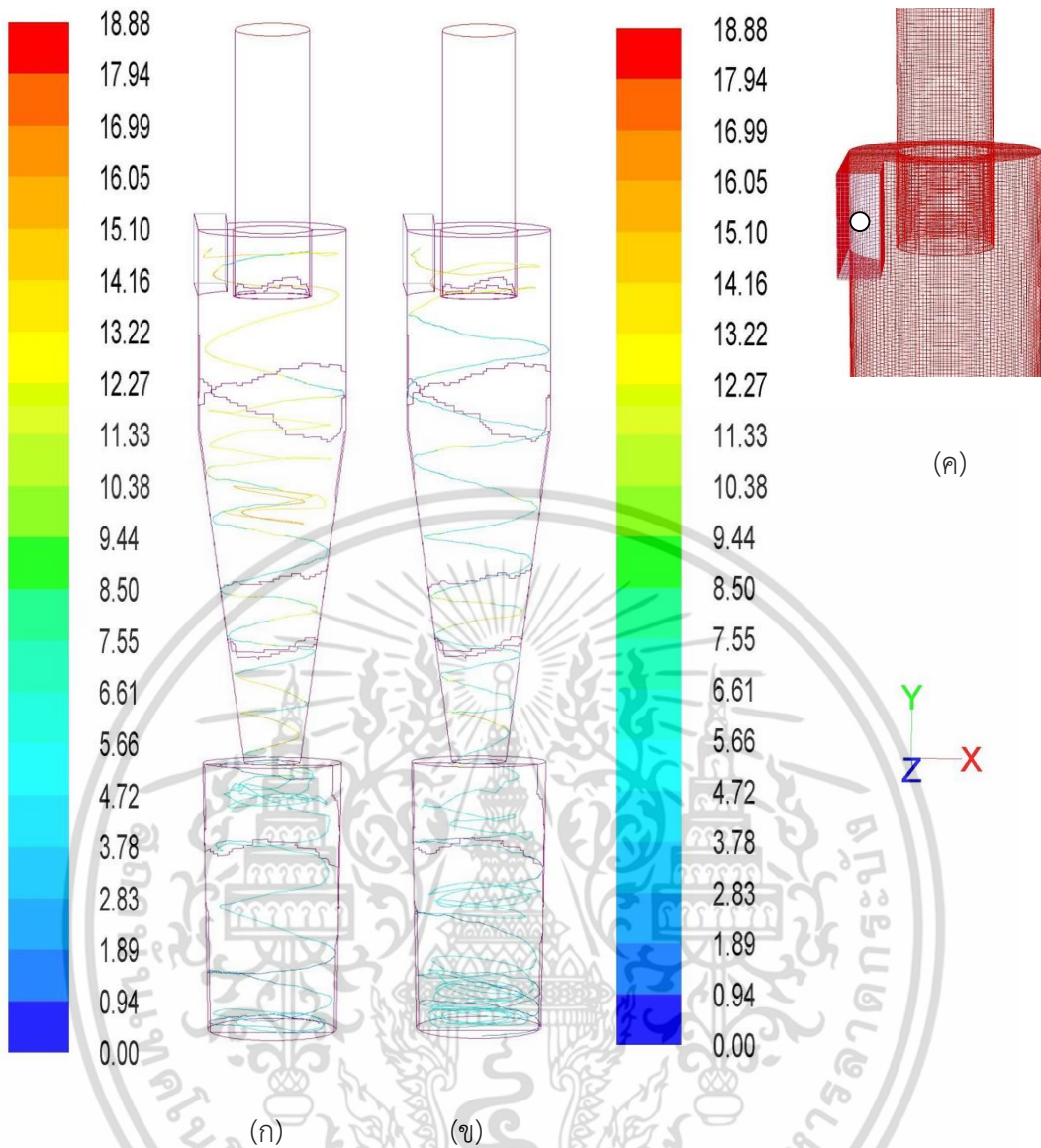
จากรูปที่ 6.27 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางเดินหมุนวนรอบท่อทางออกด้านบนเคลื่อนที่อยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านในซึ่งมีทิศทางพุ่งขึ้นทำให้ชีวมวลผงหลุดออกสู่ทางออกด้านบนของไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



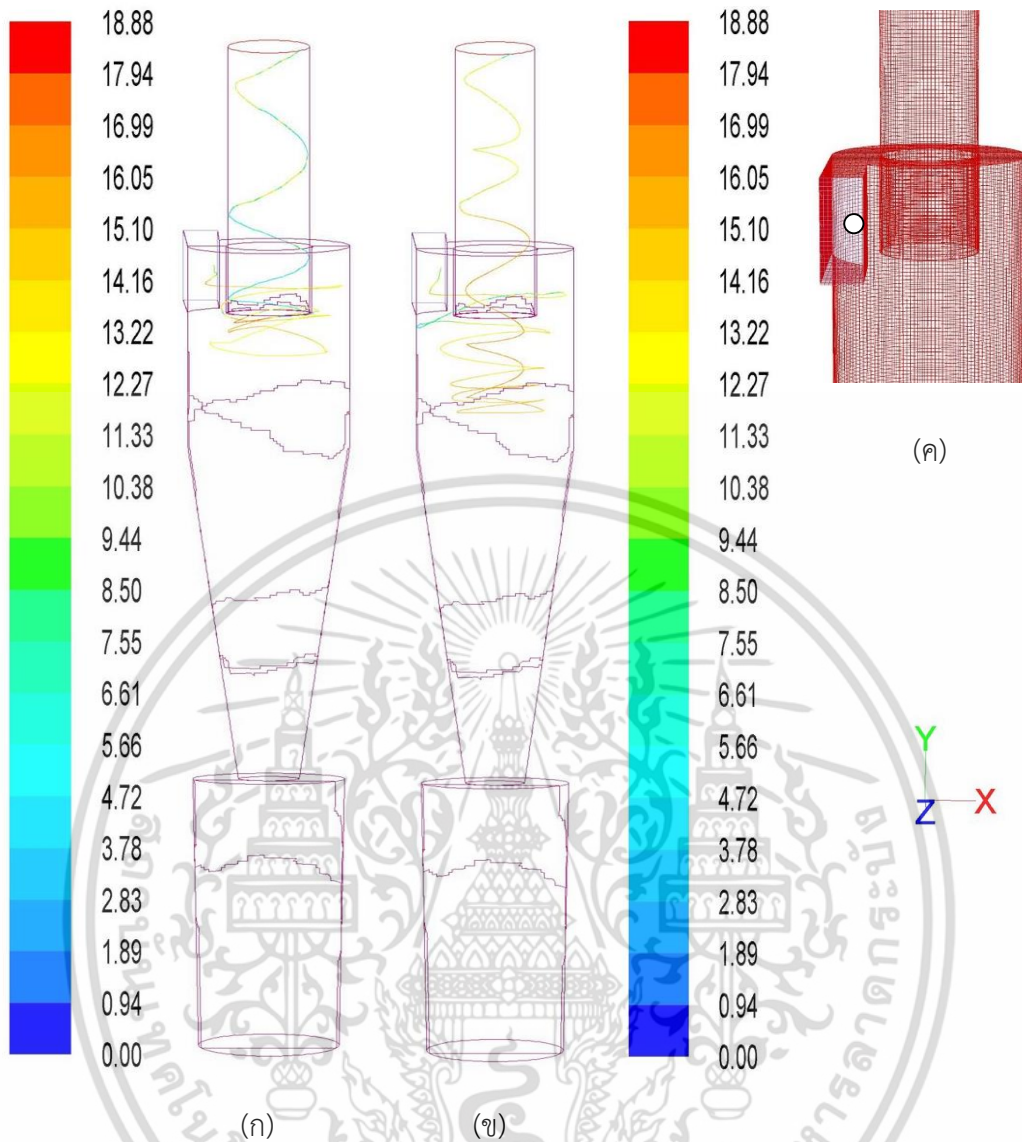
รูปที่ 6.28 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกลางด้านซ้าย (ก) เส้นทางเดินของชีวมวลผง (m/s) (ข) เส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

จากรูปที่ 6.28 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนมีเส้นทางอยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านนอกมีทิศทางพุ่งลงและเกิดการชนผนังทำให้อนุภาคตกลงสู่ทางออกด้านล่างของไซโคลนและหมุนวนในถังเก็บชีวมวล



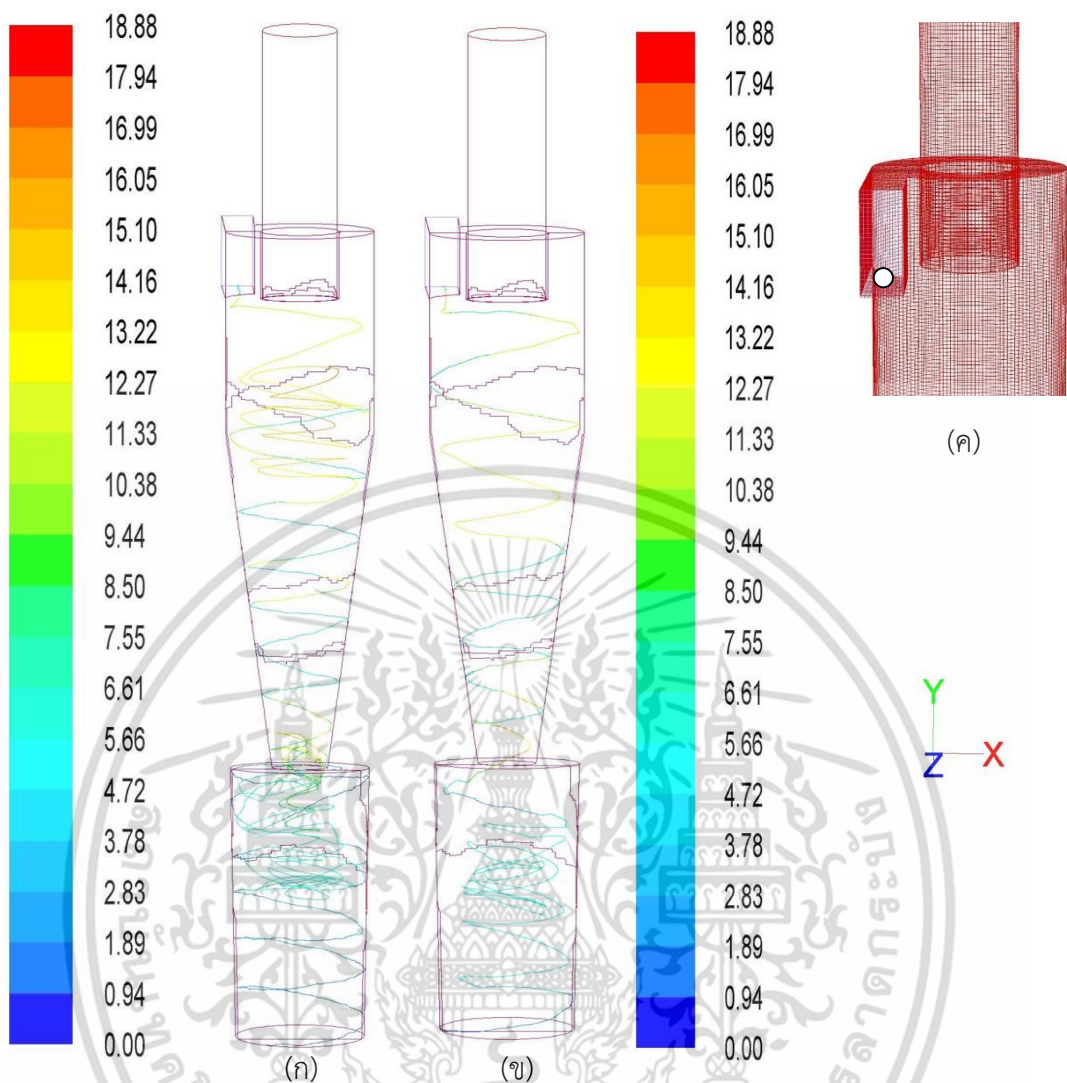
รูปที่ 6.29 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (ก) เส้นทางเดินของชีวมวลผง (m/s) (ข) เส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

จากรูปที่ 6.32 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางเดินหมุนวนรอบท่อทางออกไซโคลนด้านบนอยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านบนนอกซึ่งมีทิศทางพุ่งลงและเกิดการชนผนัง ทำให้ชีวมวลผงตกลงสู่ทางออกด้านล่างและหมุนวนในถังเก็บชีวมวล



รูปที่ 6.30 ผลการจำลองเส้นทางการเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยชีวมวลผงให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านขวา (ก) เส้นทางการเดินของชีวมวลผง (m/s) (ข) เส้นทางการเดินของชีวมวลผง ที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

จากรูปที่ 6.30 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีเส้นทางการหมุนวนรอบท่อทางออกด้านบนอยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านในมีทิศทางพุ่งขึ้น ทำให้ชีวมวลผงหลุดออกสู่ทางออกด้านบน



รูปที่ 6.31 ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้าไซโคลนเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที และปล่อยอนุภาคให้เข้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านล่าง (ก) เส้นทางเดินของชีวมวลผง (m/s) (ข) เส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman (m/s) (ค) ตำแหน่งปล่อยชีวมวลผง

จากรูปที่ 6.31 เมื่อทดลองปล่อยชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลนที่ตำแหน่งดังรูป (ค) พบว่าชีวมวลผงจะถูกบังคับให้มีการเลี้ยวเบนและมีเส้นทางเดินอยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านนอกมีทิศทางพุ่งลงเกิดการชนผนัง ทำให้ชีวมวลผงตกลงสู่ทางออกด้านล่างหมุนวนในถังเก็บชีวมวลผง

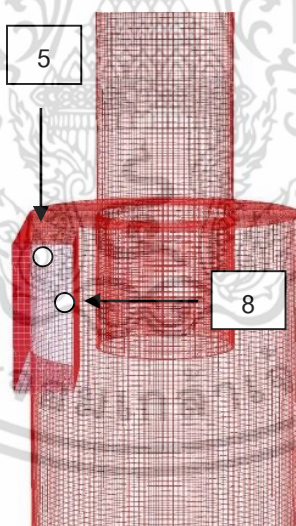
## 6.7 วิจารณ์ผลการจำลองเส้นทางเดินชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที

### 6.7.1 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman และชีวมวลผงที่ไม่พิจารณาแรง Saffman

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเส้นทางเดินของชีวมวลผง (Shape Factor = 0.6) เปรียบเทียบระหว่างชีวมวลผงที่พิจารณาแรง Saffman และไม่พิจารณาแรง Saffman ด้วยแบบจำลองโดยการเลือกแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Models) ที่พิจารณาแรง Saffman พบว่าไม่มีผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของชีวมวลผงและไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพไซโคลอน

### 6.7.2 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่ถูกปล่อยตามตำแหน่งที่กำหนดบริเวณทางเข้าไซโคลอน

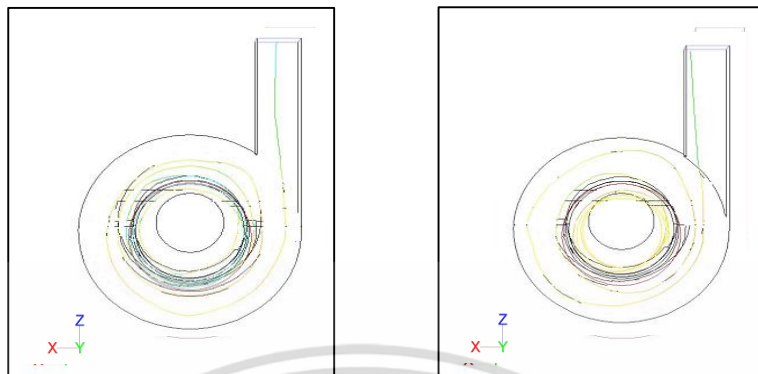
จากการจำลองได้กำหนดจุดปล่อยชีวมวลผงที่ทางเข้า ดังที่ระบุไว้ในรูปที่ 6.19 พบว่าตำแหน่งของจุดปล่อยที่ชีวมวลผงมีเส้นทางเดินหมุนวนและหลุดออกไปยังทางออกด้านบนไซโคลอน ได้แก่ จุดที่ 5 และ 8 ดังแสดงในรูปที่ 6.32



รูปที่ 6.32 ตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินหลุดขึ้นด้านบน

ตำแหน่งที่ 5 และ 8 ในการจำลองได้กำหนดจุดปล่อยชีวมวลผงจากสูงไปต่ำตามลำดับ โดยตำแหน่งที่ 8 มีระยะตามแนวรัศมีที่ใกล้จุดกึ่งกลางไซโคลอนมากกว่าตำแหน่งที่ 5 เมื่อเข้าสู่ไซโคลอนชีวมวลผงไม่มีมุมการตก และถูกบังคับให้เลี้ยวหมุนวนรอบท่อทางออกด้านบนโดยมีรัศมีในการหมุนที่แคบดังรูปที่ 6.33 ชีวมวลผงเคลื่อนที่อยู่กระแสวนอากาศหมุนด้านใน จากการเปรียบเทียบตำแหน่งใกล้เคียงของปลายท่อทางออกด้านบนคือระนาบที่ 1 ความเร็วในทิศทางตามแนวแกนรูปที่ 6.4 ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$r/R = -0.25$  และ  $0.25$  มีความเร็วสูง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ชีวมวลผงหลุดเข้าสู่ปลายท่อทางออกด้านบนได้เร็วขึ้น

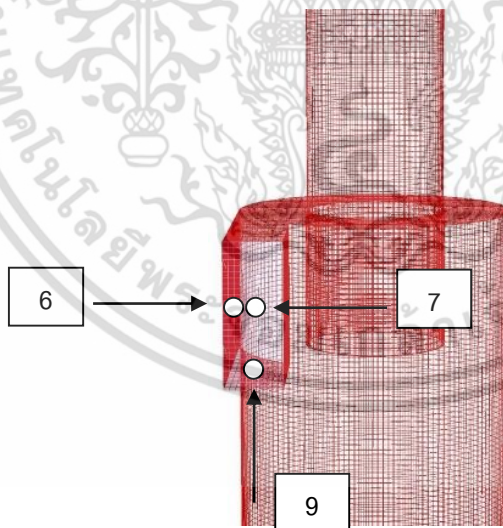


(ก) จุดปล่อยที่ 5

(ข) จุดปล่อยที่ 8

รูปที่ 6.33 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้าง (ก) จุดปล่อยที่ 5 (ข) จุดปล่อยที่ 8

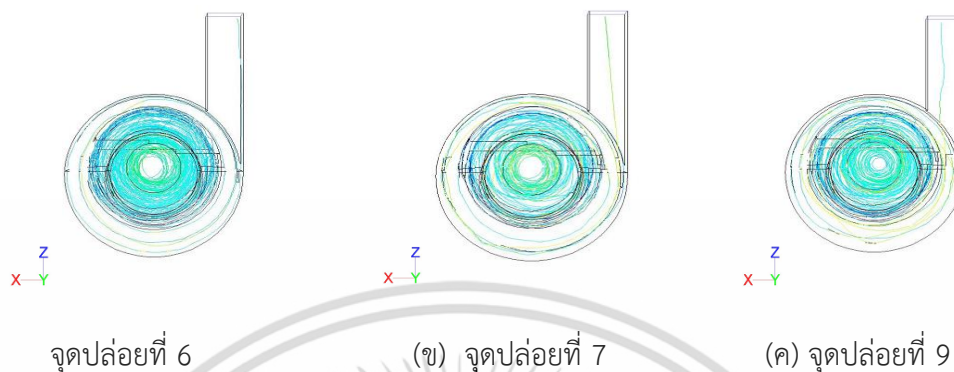
จากรูป 6.34 จะแสดงตำแหน่งที่ชีวมวลผงมีเส้นทางเดินหมุนวนและตกลงสู่ทางออกด้านล่าง ได้แก่ จุดที่ 6, 7 และ 9



รูปที่ 6.34 ตำแหน่งที่ปล่อยชีวมวลผงมีเส้นทางเดินตกลงด้านล่าง

ตำแหน่งที่ 6, 7 และ 9 ในการจำลองได้กำหนดจุดปล่อยชีวมวลผงอยู่ที่กึ่งกลางทางเข้าและมีระยะตามแนวรัศมีไกลจุดกึ่งกลางไซโคลน เมื่อเข้าสู่ไซโคลนชีวมวลผงมีมุมการตก และถูกบังคับให้เลี้ยวหมุนวนรอบท่อทางออกด้านบนโดยมีรัศมีการหมุนวนที่กว้างดังรูปที่ 6.35 เคลื่อนที่อยู่กระแสอากาศหมุนวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านนอกชนผนังกระบอกไซโคลน จากการจำลองการไหลที่ระนาบ 1, 2 และ 3 ดังที่อ้างถึงในรูปที่ 6.4, 6.6 และ 6.8 พบว่าความเร็วในทิศทางตามแนวแกนใกล้เคียงกันมีค่าติดลบซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ชีวมวลผงหมุนวนลงสู่ด้านล่าง



รูปที่ 6.35 เส้นทางเดินชีวมวลผงมีรัศมีการหมุนวนกว้าง (ก) จุดปล่อยที่ 6 (ข) จุดปล่อยที่ 7 (ค) จุดปล่อยที่ 9

## 6.8 ผลการหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศาด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข

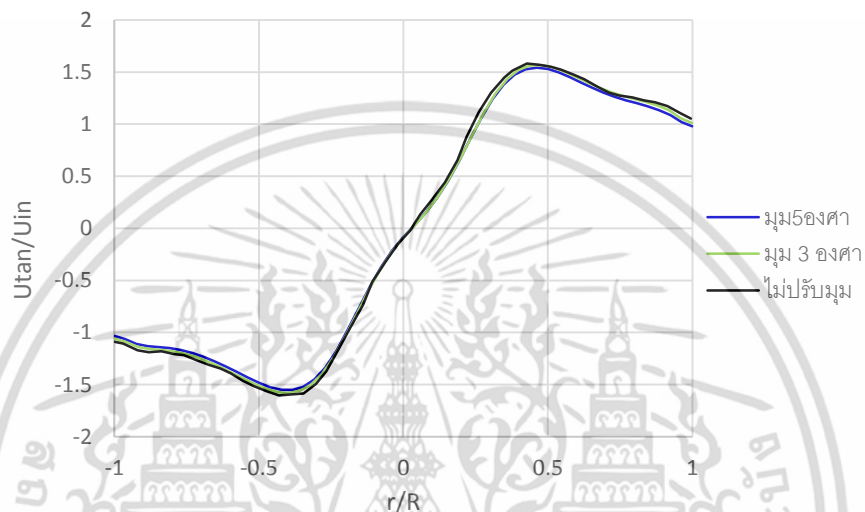
จากการวิเคราะห์ผลในหัวข้อ 6.5 และ 6.7 ในรูปที่ 6.21 และ 6.25 พบว่าชีวมวลผงที่ไม่มีมุมการตกจะมีเส้นทางเดินหลุดขึ้นสู่ทางออกด้านบนและชีวมวลผงที่มีมุมตกจะเคลื่อนที่หลุดออกทางออกด้านล่างมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการคัดแยก ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการศึกษากฎเกณฑ์ทางเข้าไซโคลนที่มีมุมตกที่ 3 และ 5 องศา โดยกำหนดมุมทางเข้าของไซโคลนเพื่อให้กระแสอากาศที่ทางเข้าทำมุมกับระนาบตามที่ต้องการศึกษา จากผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าเมื่อปล่อยชีวมวลผงขนาดตัดอนุภาคเท่า 7.40 ไมครอน ที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาทีที่มีมุมตก 3 และ 5 องศาไซโคลนกลับมีประสิทธิภาพการคัดแยกลดลงตามลำดับ ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.5 ประสิทธิภาพไซโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศา ที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที

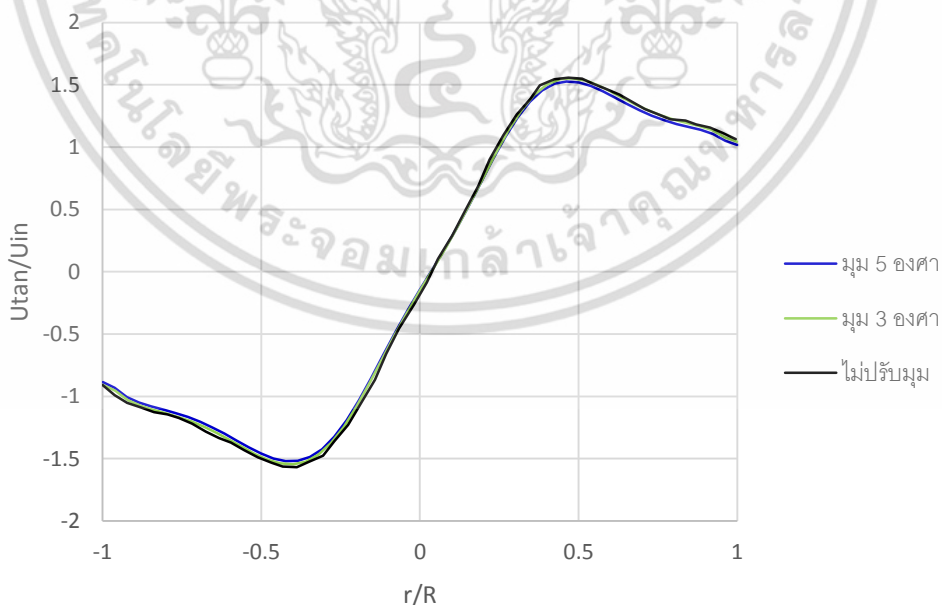
มุมทางเข้า	Injection	Escape	Trap	Incomplete	ประสิทธิภาพไซโคลน
ไม่ปรับมุม	250	76	78	68	42.8%
3 องศา	250	118	72	58	40.6%
5 องศา	250	98	67	71	37.5%

### 6.8.1 วิจัยรณผลการหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศาด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของการเปลี่ยนมุมที่ทางเข้าไซโคลนทั้ง 3 มุม พบว่ามุมทางเข้า 5 องศา ไซโคลนมีประสิทธิภาพในการคัดแยกน้อยกว่า 3 องศา โดยเมื่อมุมทางเข้าเพิ่มขึ้น จะพบว่าความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสจะมีอัตราส่วน  $U_{tan}/U_{in}$  ลดลงดังรูปที่ 6.36 6.37 และ 6.38 ทำให้แรงเหวี่ยงซึ่งมวลผงเข้าสู่ผนังไซโคลนมีค่าลดลง เป็นปัจจัยให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกลดลง

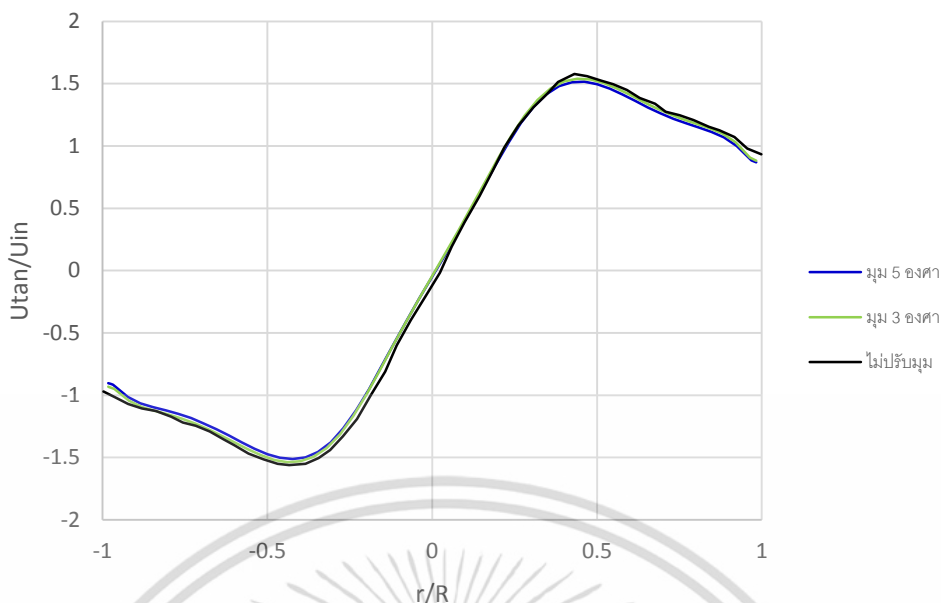


รูปที่ 6.36 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของทางเข้าไซโคลนมุม 5 องศา 3 องศา และไม่ปรับมุม ที่ระนาบ 1



รูปที่ 6.37 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของทางเข้าไซโคลนมุม 5 องศา 3 องศา และไม่ปรับมุม ที่ระนาบ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.38 ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของทางเข้าไซโคลนมุม 5 องศา 3 องศา และไม่ปรับมุม ที่ระนาบ 3

จากสมมุติฐานที่มุมตกของชีวมวลผงจะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ดีดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.6 เมื่อทำการพิสูจน์ด้วยการปรับมุมทางเข้าของไซโคลนให้มีมุมตก พบว่ามีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ เนื่องความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสที่ลดลงกล่าวคือ ความเร็วที่ลดลงจะส่งผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางลดลง ชีวมวลผงจึงถูกเหวี่ยงไปยังผนังลดลง นอกจากนี้จะพบว่าเราไม่สามารถศึกษาอิทธิพลของมุมตกโดยที่ไม่ทำการปรับมุมของสนามการไหลได้ เนื่องจากต้องปรับเปลี่ยนมุมทางเข้าของไซโคลน

## บทที่ 7

# สรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะทำการสรุปผลการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของไซโคลนทั้งหมด พร้อมทั้งให้แนวทางในการปรับปรุง เพื่อพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการคัดแยกขนาดชีวมวลผงได้ดีขึ้น และสามารถนำไปใช้ประยุกต์กับงานจริงเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยสรุปผลการทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลนกับการใช้วิธีการจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อหาสนามการไหลและเส้นทางเดินชีวมวลผงได้ดังนี้

### 7.1 สรุปผลจากการทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลน

จากงานวิจัยได้ใช้โครงสร้างไซโคลนสัดส่วนตามมาตรฐานของ Stairmand เพื่อใช้ในระบบคัดแยกชีวมวลผงและทดลองหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่าที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที มีประสิทธิภาพไซโคลนต่ำกว่าที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที เมื่อความเร็วทางเข้าเพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนที่ดีขึ้นเนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีค่ามากขึ้นและมีความดันที่ผนังไซโคลนมากขึ้น อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะถูกเหวี่ยงไปยังผนังไซโคลนได้ดีขึ้นและตกลงสู่ทางออกด้านล่าง

### 7.2 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงตัวเลขของสนามการไหลในไซโคลนกับการทดลองจากบทความ [10]

การจำลองการไหลจะพิจารณาองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกน ทั้ง 3 ระนาบ พบว่าที่เมชจำนวน 537,000 กริดให้ความเหมาะสมและใกล้เคียงกับผลการทดลองในบทความของ Shukla [10] มากที่สุด เมื่อพิจารณาความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสระนาบที่ 1, 2 และ 3 จากรูปที่ 5.10, 5.13 และ 5.16 ที่  $r/R = -0.4$  มีความเร็วต่ำสุดที่ประมาณ  $-1.75$  เท่าของความเร็วทางเข้า ที่  $r/R = 0.4$  มีความเร็วสูงสุดที่ประมาณ  $1.75$  เท่าของความเร็วทางเข้า มีการกระจายตัวเหมือนกัน เนื่องจากในบทความได้กำหนดความเร็วทางเข้าเท่ากับ 20 เมตรต่อวินาทีและมีความสม่ำเสมอ (uniform) เท่านั้น ที่ความเร็วในทิศทางตามแนวแกน จากรูปที่ 5.11, 5.14 และ 5.17 พบว่าความเร็วบริเวณใกล้เคียงผนังจะมีค่าติดลบ พิจารณาในระนาบที่ 1, 2 และ 3 มีระยะห่างจากท่อทางออกด้านบนจากน้อยไปมากอัตราส่วน  $U_{ax}/U_{in}$  จะมีความเร็วลดลงตามลำดับ และความเร็วแกนกลางจะลดลงด้วย

### 7.3 สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลข

#### 7.3.1 สรุปผลจากการจำลองการไหลในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

ในงานวิจัยได้ทำการจำลองสนามการไหลในไซโคลนโดยพิจารณา 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและเส้นทางเดินชีวมวลผง คือ ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส และความเร็วในทิศทางตามแนวแกน พบว่าที่ความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสจะประกอบด้วยการไหล 2 แบบ จากรูปที่ 6.9 ที่  $r/R = 0$  ถึง  $0.5$  เป็นกระแสการไหลที่หมุนแบบ forced vortex และ ที่  $r/R = 0.5$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 1 จะเกิดกระแสการไหลที่หมุนแบบ free vortex ทั้งนี้ในช่วง  $r/R = 0$  ถึง  $-1$  มีโปรไฟล์ของความเร็วคล้ายกันกับช่วง ตั้งแต่  $r/R = 0$  ถึง 1 แต่มีทิศทางตรงข้าม โดยมีความเบี่ยงเบนเล็กน้อยเนื่องจากอิทธิพลของทางเข้า และความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.5 และ  $-1.5$  เท่าของความเร็วทางเข้า มีการกระจายตัวที่เหมือนกัน เนื่องจากการจำลองการไหลที่กรณีศึกษาได้กำหนดความเร็วที่ทางเข้าไซโคลนให้มีความสม่ำเสมอ (uniform) เท่านั้น ความเร็วในทิศทางตามแนวแกนที่ระนาบ 1, 2 และ 3 บ่งชี้ถึงลักษณะของกระแสอากาศหมุนวนด้านในที่เกิดจากการไหลย้อนขึ้นสู่ทางออกด้านบน (reverse flow) จากรูปที่ 6.4 พบว่าการไหลมี 2 ทิศทาง คือ ทิศทางพุ่งขึ้น ในช่วงประมาณ  $-0.75 < r/R < 0.75$  และที่ผิวผนังของไซโคลนในช่วง  $r/R < -0.75$  และ  $r/R > 0.75$  การไหลมีทิศทางพุ่งลง จากการเปรียบเทียบที่ความเร็วทางเข้า 8 และ 10 เมตรต่อวินาที พบว่าที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที อัตราส่วน  $U_{ax}/U_{in}$  ที่ผิวผนังมีค่าติดลบมากกว่าที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที การกระจายความเร็วที่  $r/R$  ประมาณ  $-0.25, 0$  และ  $0.25$  มีค่าเพิ่มขึ้นแต่มีลักษณะที่คล้ายกัน ทั้ง 3 ระนาบ ดังรูปที่ 6.4, 6.6 และ 6.8 ทั้งสองปัจจัยนี้จะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของไซโคลนที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในระนาบที่ 1, 2 และ 3 มีระยะห่างจากท่อทางออกด้านบนจากน้อยไปมาก อัตราส่วน  $U_{ax}/U_{in}$  จะมีความเร็วลดลงตามลำดับ เนื่องจากมวลอากาศบางส่วนได้ออกไปจากโดเมนการไหลที่ทางออกด้านบนแล้ว การเลี้ยวเบนของมวลอากาศที่เหลืออยู่ในระนาบเหล่านี้ทำให้การอัดตัวของอากาศลดลงตามลำดับ โดยที่แกนกลางมีความเร็วลดลงเล็กน้อยตามลำดับเช่นกัน

### 7.3.2 สรุปผลจากการศึกษาเส้นทางเดินชีวมวลผงในไซโคลนที่ความเร็ว 8 และ 10 เมตรต่อวินาที

#### 7.3.2.1 สรุปผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบการเลือกแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Models) พิจารณาแรง Saffman และไม่พิจารณาแรง Saffman ที่กระทำต่อชีวมวลผง

จากการจำลองเส้นทางเดินของชีวมวลผงขนาด 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที และ 7.40 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที ในการจำลองเส้นทางเดินของชีวมวลผงในงานวิจัยนี้กำหนดให้มี Shape factor = 0.6 พบว่าเมื่อพิจารณาแรง Saffman ที่ความเร็วทั้งสอง ไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาที่และประสิทธิภาพไซโคลน ดังรูปที่ 6.14 ถึง 6.18 สอดคล้องกับผลการจำลองเส้นทางของอนุภาคทรงกลมในวิจัยของ Xiaodong [10] พบว่าแรง Saffman จะส่งผลกระทบต่ออนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 7.5 ถึง 20 ไมครอน เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 ไมครอนจะมีแรงเฉื่อยที่มากขึ้น

#### 7.3.2.2 สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่ถูกปล่อยตามตำแหน่งที่กำหนดบริเวณทางเข้าไซโคลน

จากการจำลองเชิงตัวเลขได้ทำการปล่อยชีวมวลผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.76 ไมครอนที่ความเร็วทางเข้า 10 เมตร ต่อวินาที และ 7.40 ไมครอนที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที ซึ่งได้มาจากขนาดตัดอนุภาคที่มาจากจากการคำนวณหาประสิทธิภาพไซโคลนของทั้งสองความเร็วทางเข้า กำหนดจุดปล่อยที่ทางเข้าไซโคลนตามแนวตั้งมีความสูงแตกต่างกันตำแหน่งที่ 1, 3 และ 5 ตามแนวนอนมีระยะตามแนวรัศมีจากใกล้ถึงไกลจุดกึ่งกลางไซโคลนตำแหน่งที่ 2 และ 4 ดังรูปที่ 6.19 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่ตำแหน่ง 1 และ 4 ในการจำลองได้กำหนดจุดปล่อยจากสูงไปต่ำตามลำดับ โดยตำแหน่งที่ 4 มีระยะตามแนวรัศมีใกล้จุดกึ่งกลางไซโคลนมากกว่า ปล่อยชีวมวลผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.76 และ 7.40 ไมครอนที่ทั้งสองความเร็ว พบว่าเส้นทางเดินชีวมวลผงของทั้งสองตำแหน่งหลุดขึ้นทางออกด้านบน กล่าวคือเมื่อชีวมวลผงเข้าสู่ไซโคลน จะไม่มีมุมการตก และถูกบังคับให้เลี้ยวหมุนวนรอบท่อทางออก ซึ่งมีรัศมีการหมุนวนที่แคบดังรูปที่ 6.22 และ 6.34 โดยอนุภาคอยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านในจนถึงปลายท่อทางออกด้านบน

นอกจากนี้ที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที ชีวมวลผงหลุดออกทางออกด้านบนได้เร็วกว่าที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที แม้ว่าชีวมวลผงในกรณีทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที จะมีรัศมีการหมุนวนขยายกว้างขึ้น ซึ่งทำให้ชีวมวลผงเคลื่อนที่อยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านนอก หากแต่เกิดการชนกับผนังกรวยไซโคลน ทำให้ชีวมวลผงกระดอนกลับเข้าสู่กระแสอากาศหมุนวนด้านในที่มีทิศทางของความเร็วพุ่งขึ้น ชีวมวลผงจึงหลุดออกท่อทางออกด้านบน

จากการเปรียบเทียบอัตราส่วน  $U_{ax}/U_{in}$  ณ ตำแหน่งใกล้เคียงปลายท่อทางออกคือระนาบที่ 1 จากรูปที่ 6.4, 6.6 และ 6.8 พบว่าในกรณีความเร็วทางเข้า 10 เมตรต่อวินาที ค่าสูงสุดของอัตราส่วนดังกล่าว จะมากกว่ากรณีที่ความเร็วทางเข้า 8 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ชีวมวลผงมีทิศทางพุ่งขึ้นและหลุดเข้าสู่ท่อทางออกด้านบนอย่างรวดเร็ว

เพื่อให้สามารถประเมินอิทธิพลของตำแหน่งจุดปล่อย จึงได้กำหนดจุดปล่อยตำแหน่งที่ 2 และ 3 ซึ่งในการจำลองจะอยู่กึ่งกลางทางเข้า โดยมีระยะตามแนวรัศมีจากใกล้ถึงใกล้จุดกึ่งกลางไซโคลนตามลำดับ และทำการจำลองทางเดินของจุดปล่อยอนุภาคในตำแหน่งที่ 5 ซึ่งอยู่กึ่งกลางด้านล่างของทางเข้าไซโคลนและมีระยะทางตามแนวรัศมีจากจุดกึ่งกลางไซโคลนเท่ากับตำแหน่งที่ 3 พบว่าทั้ง 3 ตำแหน่งมีเส้นทางเดินชีวมวลผงตกลงด้านล่าง ชีวมวลผงที่ถูกปล่อยเข้าสู่ไซโคลนมีมุมการตก จากนั้นชีวมวลผงจะถูกบังคับให้เลี้ยวเบนและมีรัศมีการหมุนวนที่กว้างดังรูปที่ 6.24 และ 6.36 เคลื่อนที่อยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านนอกและเกิดการชนผนังไซโคลนที่บริเวณใกล้ผนัง ที่มีความเร็วติดลบ ทำให้ชีวมวลผงตกลงสู่ด้านล่าง

### 7.3.2.3 สรุปผลการหาประสิทธิภาพของไซโคลนที่มุมทางเข้า 3 และ 5 องศาด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข

จากการจำลองเชิงตัวเลขเมื่อทำการเปลี่ยนมุมทางเข้าไซโคลนเท่ากับ 3 และ 5 องศา พบว่าประสิทธิภาพในการคัดแยกลดลงมีความสัมพันธ์กับความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสที่ลดลงกล่าวคือ ความเร็วที่ลดลงจะส่งผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางลดลง ชีวมวลผงจึงถูกเหวี่ยงไปยังผนังลดลง นอกจากนี้จะพบว่าเราไม่สามารถศึกษาอิทธิพลของมุมตกโดยที่ไม่ทำการรบกวนของสนามการไหลได้ เนื่องจากต้องปรับเปลี่ยนมุมทางเข้าของไซโคลน

## 7.4 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะทำการกล่าวถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับทดลองหาประสิทธิภาพไซโคลนและการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อประโยชน์สำหรับการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับศึกษาสนามการไหลและเส้นทางเดินของชีวมวลผงในไซโคลนต่อไปในอนาคต หรือเพื่อนำข้อมูลการวิจัยไปต่อยอด และนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาสำหรับการใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไซโคลนสัดส่วนของ Stairmand แบบ High Efficiency การกำหนดความเร็วทางเข้าที่ 8 และ 10 เมตรต่อวินาที มีความสม่ำเสมอ (uniform) ทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของความเร็วในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วในทิศทางตามแนวแกนของสัดส่วนนี้ ควรมีการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ปรับเปลี่ยนรูปทรงของทางเข้าไซโคลนเพื่อศึกษาเส้นทางเดินชีวมวลผงเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่อยู่ในกระแสอากาศหมุนวนด้านนอกได้มากขึ้น

2. ควรมีการจำลองไซโคลนที่ปรับเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านบนไซโคลนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนที่เหมาะสมเพื่อดูรัศมีการของการหมุนวน โดยที่รัศมีการหมุนวนที่กว้างจะทำให้ชีวมวลผงเกิดการชนผนังและตกลงสู่ด้านล่าง

3. ชีวมวลผงที่เลือกนำมาทดสอบหาประสิทธิภาพไซโคลนอาจเกิดการขูดสีและแตกหักทำให้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากแรงปะทะจากการป้อนอนุภาคทำให้ข้อมูลของชีวมวลผงตัวอย่างบางขนาดไม่เป็นตัวแทนของข้อมูลที่แท้จริง ดังนั้นในขณะที่ทำการทดลองจริงเมื่อนำขนาดของชีวมวลผงที่ไซโคลนดักจับได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับชีวมวลตัวอย่างจึงทำให้ข้อมูลขนาดของอนุภาคและประสิทธิภาพไซโคลนอาจมีการคลาดเคลื่อนไป

4. เพิ่มความเร็วที่ทางเข้าเพื่อศึกษาเส้นทางเดินของชีวมวลผงที่มีขนาดตัดอนุภาคอยู่ในช่วงความเร็วที่มากกว่า 10 เมตรต่อวินาที

5. มีระบบควบคุมความเร็วที่ทางเข้าไซโคลนและมีการวัดความเร็วบริเวณตำแหน่งต่างๆของไซโคลนเพื่อตรวจสอบความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสและความเร็วตามแนวแกนซึ่งจะส่งผลต่อเส้นทางเดินชีวมวลผงและประสิทธิภาพไซโคลน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J.J. Dirgo and D. Leith. "Cyclone Collection Efficiency Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions." *Aerosol Science and Technology* 4. 1985. pp. 401-415.
- [2] J.C. Kim and K.W. Lee. "Experimental Study of particle collection by small cyclones." *Aerosol Science and Technology* 12. 1990. pp. 1003-1015.
- [3] A.J. Hoekstra et al. "An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones." *Chemical Engineering Science* 54. 1999. pp. 2055-2065.
- [4] A.J. Hoekstra et al. "Cyclone Optimization on CFD predictions." Delft University of Technology Netherland. 2000
- [5] J.J. Derkson. "Separation Performance Predictions of a Stairmand High-Efficiency Cyclone." *Fluid Mechanics and Transport Phenomena* 6. 2003. pp. 1361-1369.
- [6] L. Xiaodong et al. "Numerical Simulation of The Effects of Turbulence Intensity and Boundary layer on Separation Efficiency In a Cyclone Separator." *Chemical Engineering Journal* 95. 2003. pp. 235-240.
- [7] J.Jiao et al. "Evaluation and Modifications on Reynolds Stress Model in Cyclone Separations." *Chemical Engineering Journal* 1. 2007. pp. 15-20.
- [8] E.Khairi and L.Chris. "The effect of Cyclone Height on the Flow Pattern and Performance Using LES." Tenth International Congress of Fluid Dynamics. 2010.
- [9] H.Safikhani et al. "Numerical Simulation flow field in three types of standard cyclone separators." *Advance Powder Technology* 21. 2010. pp. 435-442
- [10] S.K. Shukla et al. "Evaluation of Numerical Scheme Using different Simulation Methods For the Continuous Phase Modeling of Cyclones Separators." *Advance Powder Technology* 22. 2011. pp. 209-219
- [11] S.K. Shukla et al. "Evaluation of Numerical Scheme for Dispersed Phase Modeling of Cyclone Separators." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2014. pp. 235-246.
- [12] L. Lin et al. "Effect of Particle Diameter and Injection Position On the Separation Performance of Cyclone Separation" *Computational Multiphase Flows* 8. 2015. pp. 40-47.
- [13] E. Khairy and L. Chris. "Optimization of the Cyclone Separator Geometry for Minimum Pressure Drop Using Mathematical Models and CFD Simulations." *Chemical Engineering Science* 65. 2010. pp. 6048-6058.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] กัมปนาท แก้วปลั่ง. "การจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ ของอนุภาคเดี่ยวตามการไหลแบบปั่นป่วนในก๊าซไซโคลนแบบเป่าลง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547
- [15] J.J. Derkson. "Simulation of mass-loading effects in gas-solid cyclone separators." Powder Technology 163. 2006. pp. 59-68.
- [16] พีรพัฒน์ เทปليب. "การพัฒนาระบบควบคุมการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงขนาด 1 MW." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560
- [17] วสันต์ ศรีเมือง. "การจำลองระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2547
- [18] ชินภัทร อรุณการ. "การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

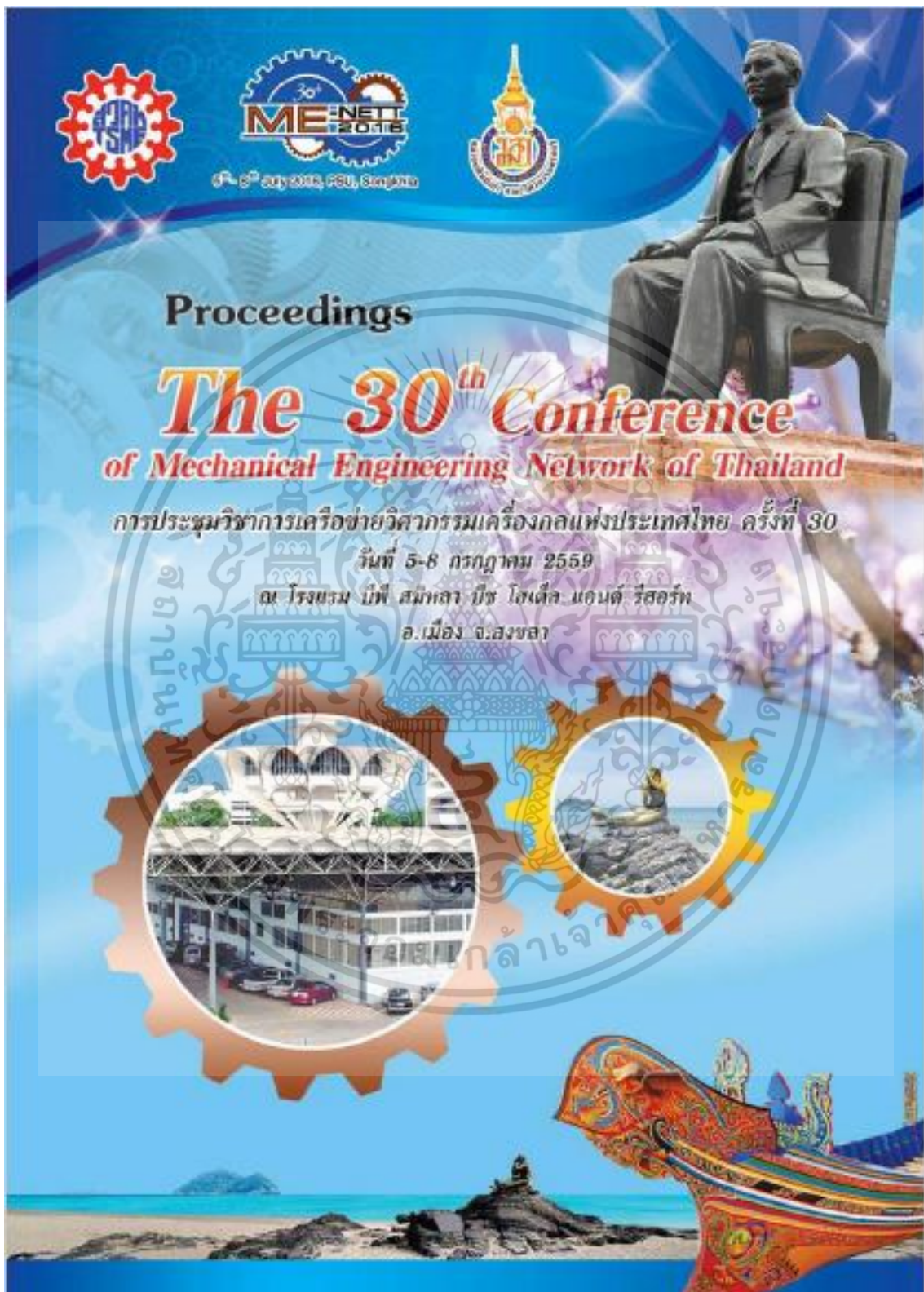
แบบสั่งผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0014

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



การศึกษาและออกแบบเครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนสำหรับเตาเผาชีวมวล  
Study and Design of Cyclone Separator for Biomass Furnace

สิริลิดา สุขทวี<sup>1</sup>, จารุวัชร เจริญสุข<sup>1</sup> และ ณัฏวิภา เจียรระโนนศิริระ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

\*ติดต่อ: [kivpaobm@kmitl.ac.th](mailto:kivpaobm@kmitl.ac.th), เบอร์โทรศัพท์ 02-3298351, เบอร์โทรสาร 02-3298352

**บทคัดย่อ**

เครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพื่อคัดแยกอนุภาค โดยประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนที่เหมาะสมของไซโคลน งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการคัดแยกเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการสร้างแบบจำลองไซโคลนตามขนาดมาตรฐานเพื่อใช้ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamic, CFD) ทำการจำลองการไหลในไซโคลนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร โดยศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละขนาด ได้แก่ขนาด 5, 10, 100 และ 500 ไมครอนที่ได้จากการทดลอง และจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้นำเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละขนาดมาเปรียบเทียบกับผลการคัดแยกอนุภาคที่ได้จากการทดลองจากผลการเปรียบเทียบว่าเส้นทางเดินของอนุภาคที่มีขนาด 5 และ 10 อนุภาคจะหลุดออกทางด้านบนของไซโคลน ที่อนุภาคขนาด 100 ไมครอน อนุภาคจะหมุนวนที่บริเวณทางออกด้านบนของไซโคลน ส่วนอนุภาคที่มีขนาด 500 ไมครอน อนุภาคจะหมุนวนอยู่บริเวณทางออกด้านล่างทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถตกลงสู่ทางออกด้านล่างได้มากขึ้น

**คำหลัก:** ไซโคลน, เตาเผาชีวมวล, การคำนวณพลศาสตร์ของไหล

**Abstract**

Cyclone separator has been one of the most widely used for particle separation. The excellent performance of cyclone separator relies on appropriate geometrical dimensions. In this research, separation efficiency of biomass is studied based on the standard dimension of cyclone separator by computational fluid dynamic (CFD). Simulation was carried out on cyclone diameter equal to 0.20 m. Trajectories of particle size 5, 10, 100 and 500 micron were monitored and compared with experimental result. Three distinctive scenario were observed; for the particle trajectories of 5 and 10 micron, it was found that the particle could escape at top of cyclone outlet while particle size 100 micron was centrifuged around top of cyclone and the largest particle size of 500 micron was centrifuged around the bottom of cyclone and fell to dipleg more than small particle.

**Keywords:** Cyclone, Biomass Furnace, Computational Fluid Dynamic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CST0014

การประชุมวิชาการระดับมหาวิทยาลัยแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



$\mu$ ความหนืดของแก๊ส(ปาสคาลต่อวินาที)	$N_e$ จำนวนรอบของการหมุนของแก๊ส
$b$ ความกว้างของท่อเข้า(เมตร)	$V_t$ ความเร็วขาเข้าไซโคลน(เมตรต่อวินาที)
$\rho_p$ ความหนาแน่นของอนุภาค(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	$\rho_g$ ความหนาแน่นของแก๊ส(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\eta$ ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาครวม	$\eta_j$ ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคในแต่ละช่วงขนาด
$f_j$ เฟอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในแต่ละช่วงขนาด	$v$ ความเร็วสิ้นสุด
$\rho$ ความหนาแน่นของอนุภาค	$m$ มวลของวัตถุ
$g$ ค่าแรงดึงดูดของโลก(9.81 เมตรต่อวินาที)	$C_D$ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านทาน
$A_F$ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ	

### 1. บทนำ

เครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนหรือไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการคัดแยกอนุภาคซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยอากาศที่มีอนุภาคจะหมุนลงด้านล่างแล้วย้อนกลับสู่ด้านบน แร่หรือผงทำให้อนุภาคที่มากับอากาศแยกตัวออกและตกลงสู่ด้านล่าง ทั้งนี้ขนาดและรูปทรงของไซโคลนเป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนให้ดีขึ้น

Stairmand[1] ออกแบบไซโคลนประสิทธิภาพสูงโดยสันนิษฐานว่าอัตราส่วนความสูงกระบอกไซโคลนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนความสูงกรวยไซโคลนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเท่ากับ 2.5 กล่าวคือความสูงไซโคลนมีค่าเป็น 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน Shi และ Wu [2] ทำการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแยกอนุภาคเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ขนาดของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเกินอัตราส่วนที่ดีที่สุด ประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่เพิ่มขึ้นเลย โดย Shi และ Wu กล่าวว่าอัตราส่วนความสูงไซโคลนมีค่าเป็น 3 ถึง 3.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน Hoffmann และคณะ [3] ได้ทดลองหาประสิทธิภาพการคัดแยกไซโคลนโดยการปรับอัตราส่วนให้เพิ่มขึ้นจนถึงค่าความสูงที่ประสิทธิภาพสูงสุด โดยหากใช้ค่าที่มากกว่าความสูงที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกตกลงอย่างรวดเร็ว Etsayed และ Lacor [4,5] ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อให้ความดันลดต่ำสุด ด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM) และใช้แบบจำลองของ Muschelknautz ซึ่งให้ความสูงกระบอกไซโคลนและความสูงไซโคลนเท่ากับ 1.618 และ 4.236 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนตามลำดับ เห็นได้ว่าการศึกษาและทดลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะทำการศึกษาการเดินทางของอนุภาคขนาดต่างๆในไซโคลนที่ได้ออกแบบขึ้น โดยการสร้างแบบจำลองไซโคลนขนาดมาตรฐาน ประกอบการคำนวณพลศาสตร์ของไหล ทำการจำลองการไหลในไซโคลน เพื่อศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการคัดแยกเบื้องต้นที่ได้จากการนำอุปกรณ์ดังกล่าวไปใช้ในการคัดแยกขนาดผงซึ่งเสียก่อนนำไปใช้ในระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผง

### 2. วิธีการทดลอง

#### 2.1 การคำนวณและออกแบบ

ในงานวิจัยนี้ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลน คือ รูปร่างสัดส่วน, การกระจายตัวและขนาดอนุภาค และอัตราการไหลของไซโคลน เนื่องจากในไซโคลนแรงที่ถูกใส่เข้าไปให้อนุภาคจะมีการหมุนเหวี่ยงซึ่งเกิดจากการหมุนของกระแสแก๊ซ ซึ่งแรงนี้จะมากกว่าแรงโน้มถ่วง และทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนจะมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CST0014

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



น้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับรูปร่างมาตรฐานที่เหมาะสม โดยรูปร่างมาตรฐานที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ดีและถูกเลือกใช้ในการทดลองนี้คือ Stairmand (High Efficiency) ซึ่งเป็นไซโคลนแบบที่มีทางเข้าของแก๊สในแนวเส้นสัมผัส (Tangential Inlet Type) โดยสัดส่วนมาตรฐานและไซโคลนที่ออกแบบมีค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของไซโคลนแสดงดังรูปที่ 1 ตารางที่ 1 สัดส่วนมาตรฐานของ Stairmand และขนาดไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	สัดส่วน, ขนาด (เมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000, 0.20
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500, 0.10
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.200, 0.040
ความยาวช่องทางออก (S)	0.500, 0.10
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D <sub>o</sub> )	0.500, 0.10
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	1.500, 0.30
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000, 0.80
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.375, 0.075

โดยได้คำนวณหาประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนได้เท่ากับ 99.76% ทั้งนี้ มีหลายตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไซโคลน เช่น ความเร็วของแก๊สที่บริเวณทางเข้าของไซโคลน, การกระจายตัวของอนุภาค เป็นต้นในการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาดหนึ่ง เรียกว่าประสิทธิภาพย่อย (Grade or Fractional Efficiency) หาได้จากสมการ Semiempirical ของ Lapple โดยใช้หลักการสมดุลของแรงเหวี่ยง และแรงดูด (Drag Force) ที่กระทำในไซโคลนเพื่อคำนวณหาขนาดตัดของอนุภาค ( $d_{pc}$ ) ซึ่งเป็นขนาดของอนุภาคที่ถูกคัดแยกด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 50 ซึ่งคำนวณได้จาก Lapple ดังสมการที่ 1

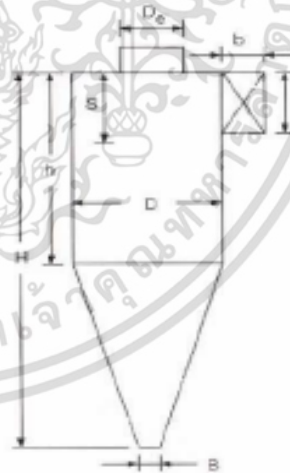
$$d_{pc} = \left( \frac{9\mu_g b}{2\pi N_c V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

สำหรับค่าประสิทธิภาพรวมหาได้จาก สมการที่ 3

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_j} \right)^2} \quad (2)$$

$$\eta = \sum \eta_j f_j \quad (3)$$

ในการศึกษาเส้นทวงเดินของอนุภาค ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดขนาดอนุภาคที่ 5, 10, 15, 100 และ 500 ไมครอนซึ่งเป็นตัวแทนประชากรอนุภาคที่ได้จากการบดของเครื่องบดเชื้อเพลิง ทำการจำลองเส้นทวงเดินของอนุภาคด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) เปรียบเทียบกับผลการคัดแยกอนุภาคที่ได้จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการคัดแยกอนุภาค กับเส้นทวงเดินที่ได้จากการจำลองเหล่านั้น



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของไซโคลน

## 2.2 ขั้นตอนการทดลอง

แผนภาพอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งมวลอัดแท่งในถังจะถูกลูกกรงสำลียงนำเข้าสู่เครื่องบดเพื่อบดให้ได้ขนาดประมาณ 0.5 มิลลิเมตรการทดลองแต่ละ

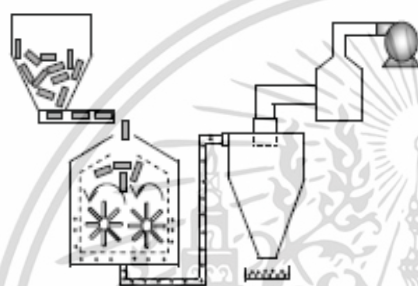
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CST0014

การประชุมวิชาการเครื่องสำอางวิศวกรรมเครื่องสำอางแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



ครั้งจะใช้เครื่องดูดอากาศ (Blower) ดูดชีวมวลน้ำหนัก 1 กิโลกรัมเข้าสู่ไซโคลนที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที ไซโคลนจะแยกชีวมวลส่วนใหญ่ออกจากอากาศกักเก็บไว้ที่ส่วนล่าง ชีวมวลที่ได้จากเครื่องบดและชีวมวลที่แยก ไซโคลนจะถูกนำไปซึ่งน้ำหนักและทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาค (Sieve Analysis) ทั้งนี้จะมีชีวมวล บางส่วนไม่ได้ถูกแยกด้วยไซโคลนและจะปนไปกับอากาศ ที่ออกทางด้านบนของไซโคลนชีวมวลส่วนนี้จะถูกแยก ออกจากอากาศด้วยตัวกรองอากาศ



รูปที่ 2 แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง

### 2.3 การจำลองการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD Simulation)

ประสิทธิภาพที่ดีในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนจะ ขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของอนุภาคและรูปทรงที่ เหมาะสมของไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละขนาด ได้แก่ขนาด 5, 10, 100 และ 500 ไมครอน จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาความเร็ว สิ้นสุด (Terminal velocity) ในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ อยู่ในไซโคลนโดยการทดลองได้นำเส้นทางเดินของ อนุภาคแต่ละขนาดมาเปรียบเทียบกับผลการคัดแยก อนุภาคที่ได้จากการทดลอง ขึ้นจนถัดไปจะพิจารณา ประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนโดยการศึกษา เส้นทางเดินของอนุภาคในไซโคลนด้วยการจำลอง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Simulation) และ ทดลองเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองต่อไป

#### 2.3.1 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Model)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS 12.0 และ ใช้การจำลองที่สภาวะคงที่ (Steady State) โดยใช้ แบบจำลอง ความเค้น เรย์โนลด์ (Reynolds Stress Model : RSM) วสันต์ ศรีเมือง[5] ได้ทำการจำลอง การไหลแบบปั่นป่วนระหว่าง K-epsilon และ RSM มา จำลองการไหล พบว่า การใช้แบบจำลองแบบปั่นป่วน RSM เท่านั้นที่สอดคล้องกับการทดลองจริง และได้รับ การยอมรับว่ามีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายการ หมุนวนอย่างปั่นป่วนของสนามการไหลในไซโคลนโดย สมการความตึงเครียดที่ใช้สำหรับเชื่อมโยงความสัมพันธ์ ระหว่างความดันและความเร็วในการจำลองนี้ได้เลือกติด อนุภาคเข้าสู่ไซโคลนจากฝั่งพื้นที่ทางเข้าของไซโคลนและ เลือกแรงที่กระทำต่ออนุภาคเป็น Saffman Liftforce ซึ่ง จะทำให้อนุภาคลอยตัวโดยเกิดจากแรงเฉือนในการ จำลองนี้จะใช้ความแม่นยำในการลู่อู่  $10^{-3}$  ทั้งนี้ ในการ หาความเร็วและเส้นทางเดินของอนุภาคให้ได้อย่าง แม่นยำด้วยเงื่อนไขที่เวลา (time step size) จะต้อง เป็นค่าที่เหมาะสมหากกำหนดค่านี้น้อยเกินไปจะทำให้ เครื่องคอมพิวเตอร์ต้องทำงานหนักในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ขึ้นเวลาจะเลือกใช้ที่ 0.001 วินาทีการไหลของแก๊สและ การจำลองการไหลของอนุภาคในไซโคลนจะถูกแสดงด้วย แบบจำลองของการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (discrete phase) และ Particle Track Method จะถูกนำมาใช้แต่ ยังไม่สามารถแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ที่แตกต่างของ อนุภาคได้อย่างชัดเจนโดยมีการตั้งสมมติฐานว่า หาก อนุภาคสัมผัสกับส่วนล่างของทางออก อนุภาคจะสิ้นสุด การเคลื่อนที่และถูกกักเก็บที่ส่วนนี้โดยประสิทธิภาพการ กักเก็บจะถูกคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างอนุภาคที่ตก ลงมาสู่ด้านล่างไซโคลนกับอนุภาคที่ปล่อยเข้ามา

#### 2.3.2. แบบจำลองไซโคลน (Cyclone Model)

การออกแบบไซโคลนสัดส่วนมาตรฐาน ดังแสดง ในตารางที่ 1) และสร้างแบบจำลองเมช (Mesh) ของ ไซโคลนแสดงดังรูปที่ 3 และทำการเปรียบเทียบจำนวน กริดที่เหมาะสมในการคำนวณโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลง จำนวนเมชจาก 124,020 , 221,608 , 512,000 กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CST0014

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



พบว่ามีขนาดเท่ากับ 512,000 กริด มีความเหมาะสม  
สำหรับใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3

อนุภาค (Sieve Analysis) ก่อนเข้าและออกจากไซโคลน  
ผลที่ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 เมชของไซโคลน

### 2.3.3 เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด

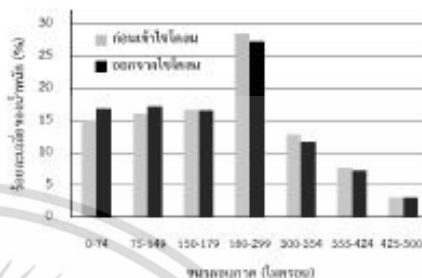
โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเส้นทางการของอนุภาคแต่ละ  
ขนาดได้แก่ขนาด 5, 10, 100 และ 500 ไมครอนที่ได้  
จากการทดลอง และจากการจำลองพลศาสตร์ของไหล  
เชิงคำนวณได้นำเส้นทางการของอนุภาคแต่ละขนาดมา  
เปรียบเทียบกับผลการคัดแยกอนุภาคที่ได้จากการทดลอง  
เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลน

### 3. ผลการทดลองและวิธีการผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการคัด  
แยกอนุภาคของไซโคลนโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของ  
ไหลเชิงคำนวณเข้ามาช่วยเพื่อให้ทำนายเส้นทางการ  
ของอนุภาคแต่ละขนาดเพื่อทำการเปรียบเทียบและ  
วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการคัดแยกเพื่อทำการ  
เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้โดยผลการทดลองได้  
แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

#### 3.1 ผลจากการทดลอง

หลังจากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการคัดแยก  
อนุภาคของไซโคลนได้ทำการทำการกระจายตัวของ



รูปที่ 4. กรการกระจายตัวของอนุภาคก่อนเข้า  
และออกจากไซโคลน

จากผลการทดลองนำอากาศและอนุภาคขนาด 0.5  
มิลลิเมตร หนัก 1 กิโลกรัมเข้าสู่ไซโคลนที่ความเร็ว 10  
เมตรต่อวินาทีด้วยเครื่องดูดอากาศ (Blower) และทำการ  
เก็บอนุภาคที่ฝังขอยกด้านล่างของไซโคลนไปชั่งน้ำหนัก  
พบว่าอนุภาคทั้งหมดมีน้ำหนักออกด้านล่างมีน้ำหนัก  
0.98 กิโลกรัม จากนั้นได้นำไปทำการทำการกระจายตัว  
ของอนุภาคในแต่ละขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดซึ่งมี  
ตะแกรงทั้งหมด 7 ขนาดได้แก่ 0, 75, 150, 180, 300,  
355 และ 425 ไมครอน โดยนำอนุภาคทั้งหมดทั้งก่อน  
เข้าและฝังขอยกด้านล่างของไซโคลนอย่างละ 200 กรัม  
ใช้เวลาในการร่อนตะแกรงเพื่อทำการกระจายตัวของ  
อนุภาค ครั้งละ 10 นาที จากนั้นนำน้ำชั่งน้ำหนักของ  
อนุภาคในแต่ละขนาดที่ผ่านตะแกรงร่อนด้วยเครื่องชั่ง  
แบบดิจิทัลความละเอียด 0.01 กรัม (ดังรูปที่ 5) โดยทำ  
ทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นนำน้ำหนักที่ห้ำงอยู่บนตะแกรงแต่ละ  
ขนาดมาหารอ้อยละของน้ำหนักทั้งหมดที่นำมาทดลอง  
และหาค่าเฉลี่ย จากผลการทดลองจากรูปที่ 4 แสดงให้  
เห็นว่าอนุภาคที่ออกจากเครื่องบดนี้มีการกระจายตัว  
ของอนุภาคที่หลากหลาย โดยมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ย  
ของอนุภาคอยู่ในช่วง 180 - 299 ไมครอนมากที่สุด, 150  
- 179 ไมครอน, 75 - 149 ไมครอน, 0 - 74 ไมครอน,  
300 - 344 ไมครอน, 355 - 424 ไมครอน และ 425 -  
500 ไมครอน ตามลำดับ เมื่ออนุภาคผ่านไซโคลนพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CST0014

การประจําวิชาการศึกษาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



การกระจายตัวของอนุภาคโดยมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วง 180 – 299 ไมครอนมากที่สุด, 75 – 149 ไมครอน, 0 – 74 ไมครอน, 150 – 179 ไมครอน 300 – 344 ไมครอน และ 355 – 424 ไมครอนตามลำดับ จากการหาการกระจายตัวของอนุภาคที่ผ่านเครื่องบดและทางออกด้านล่างของไซโคลนพบว่าน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคที่อยู่ในช่วง 150 – 424 ไมครอนจะมีน้ำหนักลดลงเมื่อผ่านไซโคลน และมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคที่อยู่ในช่วง 0 – 75 ไมครอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กบางส่วน ไซโคลนไม่สามารถทำการคัดแยกได้จึงปะปนไปกับอากาศและหมุนวนหลุดไปที่ทางออกของไซโคลนในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่เกิดการหมุนวนที่บริเวณตรงรอยและทางออกด้านล่างของไซโคลนทั้งหมดซึ่งอนุภาคที่เลือกน้ำหนักวิเคราะห์ทางเกิดการแตกตัวหรืออุกคัสให้มีขนาดเล็กลงเนื่องจากแรงปะทะจากการป้อนอนุภาคที่มีความเร็วสูงเบญจวรรณ โชคพิพัฒน์ผล [6]

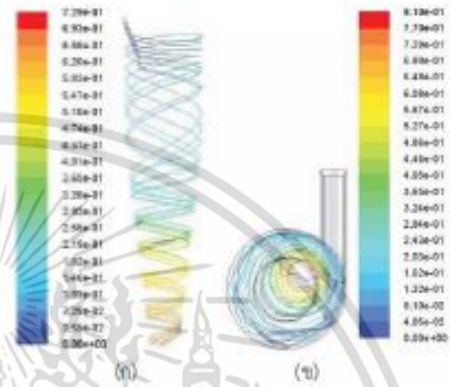


รูปที่ 5 เครื่องชั่งน้ำหนัก "ARC120" 0.01 กรัม

### 3.2 ผลจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD)

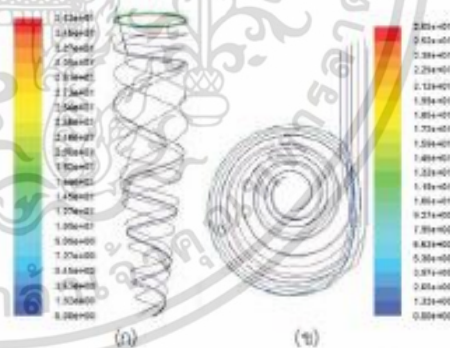
จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ขนาดอนุภาคเท่ากับ 500 ไมครอนดังรูปที่ 6 กำหนดให้เริ่มนับเวลาเดินทางของอนุภาคบริเวณทางเข้าที่ 0 วินาที จากนั้นอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่และหมุนวนอยู่บริเวณ

ทางออกด้านล่างที่เวลา 7.29 วินาที หากอนุภาคสัมผัสกับส่วนล่างของทางออกไซโคลน อนุภาคจะสิ้นสุดการเคลื่อนที่และหลุดออกไปยังส่วนทางออกด้านล่างของไซโคลน



รูปที่ 6 เส้นทางเดินของอนุภาคขนาด 500 ไมครอน (ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0

เส้นทางเดินของอนุภาคขนาด 100 ไมครอน อนุภาคจะมีการหมุนวนที่บริเวณทางออกไซโคลนที่เวลา 1.82-3.63 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7

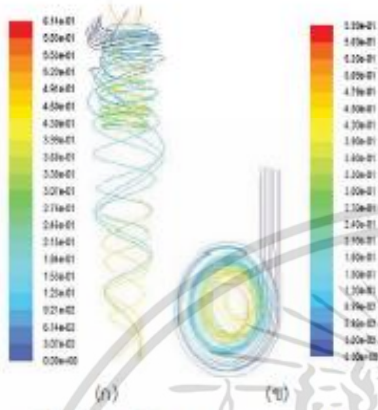


รูปที่ 7 เส้นทางเดินของอนุภาคขนาด 100 ไมครอน (ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0 ที่อนุภาคเท่ากับ 10 และ 5 ไมครอนดังรูปที่ 8 และ 9 พบว่าเส้นทางเดินของอนุภาคบริเวณทางเข้าที่เวลา 0 วินาที จากนั้นอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่หมุนวนและหลุด

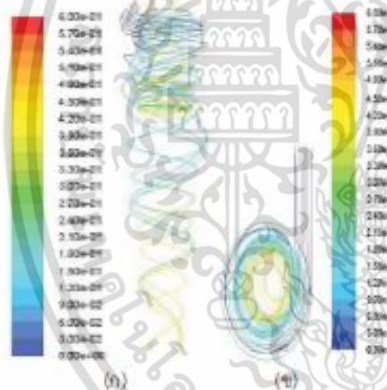
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ออกที่ทางออกของโซลิดตันบนที่เวลา 6.14 และ 6.0 วินาที



รูปที่ 8 เส้นทางเดินของอนุภาคขนาด 10 ไมครอน  
(ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0



รูปที่ 9 เส้นทางเดินของอนุภาคขนาด 5 ไมครอน  
(ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0

จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคของโซลิดตันมีค่าเท่ากับ 98.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการคัดแยกของโซลิดตันที่ได้ออกแบบไว้มีค่าเท่ากับ 99.76 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าเมื่อผ่านโซลิดตันแล้วการกระจายตัวของอนุภาคจะมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคช่วง 150 - 424 ไมครอนมี

น้ำหนักลดลง ซึ่งจากผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลจะพบว่าในช่วงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ในช่วง 100 - 500 จะมีอนุภาคหมุนวนที่บริเวณทรงกรวยและทางออกด้านล่างของโซลิดตันที่เวลามากขึ้นและอาจทำให้อนุภาคมีการขัดสีทำให้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากแรงปะทะจากการปะทะอนุภาคที่มีความเร็วสูงจึงทำให้อนุภาคส่วนนี้มีการแตกตัว เบญจวรรณ โชติพิพัฒน์ผล [6] และทำให้อนุภาคที่มีการกระจายตัวช่วง 0 - 75 ไมครอนมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและรูปที่ 4 จะพบว่าอนุภาคที่มีขนาด 0 - 10 ไมครอนจะเกิดการหมุนวนที่บริเวณทางออกโซลิดตันและหลุดออกไปที่ทางออกด้านบน

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองพบว่าโซลิดตันมีประสิทธิภาพในการคัดแยกได้ 98.60 เปอร์เซ็นต์ และมีอนุภาคที่ไม่สามารถดักจับได้อยู่ 1.40 เปอร์เซ็นต์ จากแนวจำลองพลศาสตร์ของไหลซึ่งคำนวณได้แสดงให้เห็นว่าเส้นทางเดินของอนุภาคภายในโซลิดตันของอนุภาคขนาดเล็ก มีแนวโน้มที่จะอยู่ในบริเวณทางออกด้านบนของโซลิดตันมาก ทำให้โซลิดตันมีประสิทธิภาพต่ำในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กในช่วง 0 - 10 ไมครอน ในขณะที่เส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะใช้เวลาอยู่ในบริเวณทรงกรวยและทางออกด้านล่างของโซลิดตันมากกว่า ทำให้โซลิดตันมีประสิทธิภาพสูงในการดักจับอนุภาคขนาดใหญ่ในช่วง 100 - 500 ไมครอน ทั้งนี้การกระจายตัวของอนุภาคน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยเข้าโซลิดตันและหลังการคัดแยกด้วยโซลิดตันของอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่จะมีค่าลดลง เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่มีการหมุนวนที่บริเวณทรงกรวยและทางออกของโซลิดตันในเวลาที่มากขึ้นในการวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคบางส่วนอาจเกิดการขัดสีมีขนาดเล็กลงและตกลงสู่ทางออกด้านล่างของโซลิดตันด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0014

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



### 5.เอกสารอ้างอิง

- [1] C.J. Stairmand, The design and performance of cyclone separators, *Trans. Inst.Chem. Eng.* 29 (1951) 356–383.
- [2] M.X. Shi, X.L. Wu, Development of cyclone separation technology, in: G.H.Yang (Ed.), *Collected Works of Petroleum Science and Technology*, University of Petroleum Press, Dongying, Shandong, China, 1993, pp. 175–191.
- [3] A.C. Hoffmann, L.E. Stein, *Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation*, second ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [4] K. Elsayed, C. Lacor, The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, *Appl. Math. Model.* 35 (2011) 1952–1968.
- [5] วสันต์ ศรีเมือง (2547). การจำลองวิธีระเบียบเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน, ปรียญานันท์ (จ.ศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [6] เบลูจวรรณ โชคพิพัฒนผล (2539). การศึกษาและออกแบบไซโคลนเพื่อลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้, ปรียญานันท์ (จ.ศ.ม. วิศวกรรมเคมี), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	สิริธิดา สุขทั่ว
วัน เดือน ปีเกิด	18 กรกฎาคม 2532
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	2555-2558 วิศวกรโครงการ บริษัท โตโย ไทย คอร์ปอเรชั่น จำกัดมหาชน

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

พ.ศ. 2559	การศึกษาและออกแบบเครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนสำหรับเตาเผาชีวมวล Study and Design of Cyclone Separator for Biomass Furnace, การ ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
-----------	--



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้