

การออกแบบไซโคลนโดยจำลองกระบวนการและการพิมพ์สามมิติ



นายจิรวัดน์ จิ่งเจริญสุขยิ่ง

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CYCLONE DESIGN BY PROCESS SIMULATION AND THREE-DIMENSIONAL PRINTING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบไซโคลนโดยจำลองกระบวนการและการพิมพ์สามมิติ
โดย	นายจิรวุฒน์ จิ่งเจริญสุขขัยิ่ง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ศราวุธ ภูไพบจิตรกุล)

จิรวุฒน์ จิ่งเจริญสุขยิ่ง : การออกแบบไซโคลนโดยจำลองกระบวนการและการพิมพ์สามมิติ (CYCLONE DESIGN BY PROCESS SIMULATION AND THREE-DIMENSIONAL PRINTING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.คุณากร ภูจินดา, 101 หน้า.

การเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ และชีวมวล ภายใต้กระบวนการทางความร้อนในการผลิตไฟฟ้าของอุตสาหกรรมต่างๆ มักพบสารประกอบอินทรีย์ในเถ้า ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ ปะปนออกมากับแก๊สผลิตภัณฑ์หลังการเผาไหม้ นักวิจัยจึงพยายามจะหาวิธีแยกเถ้า หรือ อนุภาคของแข็งเหล่านี้ออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ไซโคลน เนื่องจากไซโคลนสามารถสร้างได้ง่าย ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ โดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊ส ปัจจุบันมีการพัฒนาไซโคลนให้มีรูปร่างต่างๆ แต่ยังคงงานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างไซโคลนกับประสิทธิภาพการแยกทั้งในเชิงคำนวณและเชิงทดลอง โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ การหาแบบจำลองและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลนในระบบสามมิติจากการทดลองของ Azadi และคณะ เพื่อนำมาศึกษาผลของความดันลด และประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ปรับเปลี่ยนจากไซโคลนสแตมาน และสร้างไซโคลนสแตมานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ซึ่งมีความสามารถในการปรับแต่งรูปร่างสูง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลจากการทดลองไซโคลนต้นแบบกับผลจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลที่ได้พบว่า แบบจำลองที่เหมาะสมต่อการใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของไซโคลนในระบบสามมิติ คือ RNG k-epsilon model ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเท่ากับ 6×10^5 และมีความเร็วทางเข้าเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที โดยได้นำมาศึกษาผลของไซโคลนในรูปร่างต่างๆ ดังนี้ ไซโคลนสแตมาน ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% และ ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% ซึ่งมีไซโคลนเพียงรูปแบบเดียวที่ให้ผลของประสิทธิภาพในการแยกสูงกว่าไซโคลนสแตมาน คือ ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% โดยให้ประสิทธิภาพสูงกว่าประมาณ 1.4%

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5771940623 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CFD/ INLET ANGLE/ VORTEX FINDER/ CYCLONE/ THREE-DIMENSIONAL PRINTING

JIRAWAT JUENGCHAROENSUKYING: CYCLONE DESIGN BY PROCESS SIMULATION AND THREE-DIMENSIONAL PRINTING. ADVISOR: ASSOC. PROF.BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF.KUNAKORN POOCHINDA, Ph.D., 101 pp.

Biomass and fossil fuels are conventional fuels which are combusted for electricity production in various industries. Inorganic compound commonly found in ash is associated with the product gas after combustion. The device that is widely used to separate the ash out of product gas is cyclone, making use of centrifugal and gravity forces, due to the simple construction, low maintenance cost, and high reliability. Cyclone has been developed in various shapes. There is also a lack of research on the relationship between cyclone shape and collection efficiency in both numerical and experimental terms. This research is divided into 3 parts, finding a model and suitable conditions for computational fluid dynamics in three-dimensional system of cyclone from Azadi et al, studying the effect of cyclone pressure drop and collection efficiency of cyclone shapes modified from Stairmand high efficiency cyclone and constructing cyclone prototype via three-dimensional printing technology, which is easy to configure different shape. In addition, the results from the cyclone experimental are compared with the results from the computational fluid dynamics simulation. It was found that the RNG k-epsilon model is suitable used for flow analysis behavior inside the cyclone with solid volume fraction about 6×10^{-5} and inlet velocity about 15 m/s. For the effects of cyclone shapes, it had been found that decreasing the diameter of vortex finder by 10% comparing with Stairmand cyclone would increase the collection efficiency by about 1.4%.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2017 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง การออกแบบไซโคลนโดยจำลองกระบวนการและการพิมพ์สามมิติ ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความเมตตาช่วยเหลืออย่างดียิ่ง และคำแนะนำต่างๆ จากหลายฝ่าย ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณบุคคลต่างๆ ที่ได้ให้ความสนับสนุนและช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา ที่คอยให้คำแนะนำในด้านการดำเนินการวิจัยทั้งการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และให้กำลังใจ ตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ศราวุธ ภูไพจิตรกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษาสำหรับผู้ช่วยวิจัยระดับปริญญาโทจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT)

ขอขอบคุณ คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคนที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยอย่างเต็มที่มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ทุกคนในภาควิชาที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้กำลังใจในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณ นายสุชาติ กริแสง ดร.สุทธิชัย บุญประสพ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้อง ในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างเสมอมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ไฮโคลน.....	6
2.1.1 หลักการทำงานของไฮโคลน.....	7
2.1.2 การออกแบบไฮโคลน.....	9
2.1.3 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อสมรรถนะของไฮโคลน.....	10
2.1.4 สมรรถนะของไฮโคลน	10
2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	12
2.2.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processor).....	13

2.2.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา (Analysis).....	14
2.2.3	ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor)	14
2.3	ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization) [20]	15
2.4	เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ.....	20
2.4.1	การฉีดวัสดุผ่านหัวฉีด	21
2.4.2	ข้อจำกัดของการฉีดเทอร์โมพลาสติก	22
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1	ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น	26
3.2	การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	27
3.2.1	ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (pre-processor).....	27
3.2.1.1	การทดสอบปริมาตรควบคุม (grid independent test).....	29
3.2.1.2	การทดสอบเวลาในการจำลอง (time independent test).....	30
3.2.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) และแก้ปัญหา	30
3.2.3	ขั้นตอนหลังการคำนวณ.....	43
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	44
3.3.1	ข้อมูลเบื้องต้นก่อนการใช้งานเครื่องพิมพ์สามมิติ	44
3.3.2	ขั้นตอนสำหรับการพิมพ์สามมิติ.....	46
3.3.3	การติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน	48
3.3.4	ขั้นตอนการทดลองในห้องปฏิบัติการ	49
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	51
4.1	การศึกษาโมเดลและภาวะสำหรับการจำลองกระบวนการ.....	51

4.1.1 การทดสอบปริมาตรสำหรับการคำนวณ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง (grid and time independent test).....	51
4.1.2 การทำโมเดลและภาวะสำหรับจำลองกระบวนการโดยเทียบกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9] (Experimental Validation).....	53
4.2 การศึกษาผลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ.....	56
4.2.1 ไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ดัดแปลงจากไซโคลนสแตมาน	57
4.2.2 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ	59
4.2.2.1 ผลของความเร็วในแนวแกน (axial velocity) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ เทียบกับไซโคลนสแตมาน ที่ $z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร	60
4.2.2.2 ผลของความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ เทียบกับไซโคลนสแตมาน ที่ $z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร	66
4.2.2.3 ผลของความเร็วในแนวรัศมี (radial velocity) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ เทียบกับไซโคลนสแตมาน ที่ตำแหน่ง $z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร.....	72
4.2.2.4 ความดันสถิต (static pressure).....	78
4.2.2.5 เวกเตอร์ของความเร็วในไซโคลน (velocity vectors).....	81
4.2.2.6 สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (solid volume fraction).....	83
4.2.2.7 ผลของความดันลด (pressure drop) และประสิทธิภาพในการแยก (collection efficiency) ของไซโคลนสแตมาน (cyclone I) และไซโคลนรูปร่างต่างๆ	89
4.3 การศึกษาผลการทดลองด้วยไซโคลนต้นแบบสามมิติ และเทียบผลกับการจำลองกระบวนการ (simulation) ของไซโคลนสแตมาน	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94

5.1.1 การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองและภาวะที่เหมาะสมสำหรับไซโคลนสแตมาน (Stairmand cyclone) ในระบบสามมิติสำหรับการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD)	94
5.1.2 การศึกษาผลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ จากการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	95
5.1.3 การศึกษาผลจากการทดลองเทียบกับผลจากการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
รายการอ้างอิง	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	สแตมันไซโคลน (Stairmand high efficiency cyclone).....	6
รูปที่ 2.2	(ก) การไหลของแก๊สในไซโคลน (ข) รูปร่างของไซโคลนมาตรฐาน (ค) ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนแต่ละประเภท.....	8
รูปที่ 2.3	โดเมนสำหรับการคำนวณ (computational domain) และปริมาตรควบคุม (control volume)	13
รูปที่ 2.4	(ก) กราฟเส้นของความเร็วในแนวแกน (axial velocity) และ (ข) ความเร็วแนวสัมผัส (tangential velocity).....	14
รูปที่ 2.5	(ก) รูปแบบเวกเตอร์ของความเร็ว (ข) รูปคอนทัวร์ของความดัน	15
รูปที่ 2.6	ปริมาตรควบคุมและตำแหน่งที่สนใจในระบบสามมิติ.....	15
รูปที่ 2.7	วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE.....	19
รูปที่ 2.8	การวาง layer ของวัตถุซ้อนกันหลายๆ ชั้นจนกลายเป็นชิ้นงาน.....	20
รูปที่ 2.9	ลักษณะของม้วนพลาสติก PLA และ ABS สำหรับการพิมพ์สามมิติ	22
รูปที่ 3.1	กระบวนการในการพิมพ์สามมิติ เริ่มจากการสร้างไฟล์สามมิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่งไปยังเครื่องพิมพ์ จนได้ชิ้นงานต้นแบบสามมิติ.....	27
รูปที่ 3.2	(ซ้าย) โดเมนคำนวณ (computational domain) (ขวา) การแบ่งโดเมนคำนวณเป็นปริมาตรควบคุม (control volume) ในระบบสามมิติ	28
รูปที่ 3.3	โดเมนคำนวณในระบบสามมิติของไซโคลน (ก) 120,000 เซลล์ (ข) 180,000 เซลล์ และ (ค) 240,000 เซลล์.....	30
รูปที่ 3.4	เครื่องพิมพ์สามมิติ ยี่ห้อ Flashforge รุ่น Creator Pro/ Dual.....	44
รูปที่ 3.5	หน้าจอโปรแกรม MakerWare สำหรับสร้างไฟล์ชิ้นงานเป็นสามมิติ เพื่อส่งเข้าเครื่องพิมพ์.....	46
รูปที่ 3.6	ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดัน (ก) ทางเข้าของไซโคลน (ข) บริเวณทางออกของแก๊สและ (ค) บริเวณทางออกด้านล่าง	48

รูปที่ 3.7 (ก) อุปกรณ์รับสัญญาณบลูทูธสำหรับเซ็นเซอร์วัดความดัน (ข) แอปพลิเคชันสำหรับอ่านค่าความดัน.....	48
รูปที่ 3.8 เครื่องอัดอากาศ (air compressor).....	49
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ (air flow meter).....	49
รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำการทดลอง.....	50
รูปที่ 4.1 ผลการกระจายตัวโดยเฉลี่ยของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งต่อความสูงของไซโคลนสแตมมานที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ.....	52
รูปที่ 4.2 ผลของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเวลาของไซโคลนสแตมมานที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ.....	53
รูปที่ 4.3 ผลของความดันลดที่ความเร็วของทางเข้าต่างๆ จากการจำลองกระบวนการเทียบกับผลจากการทดลองของไซโคลนขนาดเล็ก Cyclone I.....	55
รูปที่ 4.4 ผลของความดันลดที่ความเร็วของทางเข้าต่างๆ จากการจำลองกระบวนการเทียบกับผลจากการทดลองของไซโคลนขนาดใหญ่ Cyclone II.....	55
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งแสดงผลของความเร็วต่างๆ และสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ Z= 0.02 0.05 และ 0.08 เมตร.....	56
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของไซโคลนในระบบสามมิติในรูปร่างต่างๆ จากโปรแกรม GAMBIT 2.2.30	58
รูปที่ 4.7 การไหลของแก๊สและอนุภาคในทิศทางต่างๆ ภายในไซโคลน (ก) การไหลในแนวแกน (ข) การไหลในแนวสัมผัส และ (ค) การไหลในแนวรัศมี.....	59
รูปที่ 4.8 ความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมมาน ที่ z=0.02 เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%.....	61
รูปที่ 4.9 ความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมมาน ที่ z=0.05 เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%.....	62
รูปที่ 4.10 ความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมมาน ที่ z=0.08 เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%.....	63

รูปที่ 4.11 คอนทัวร์ความเร็วแนวแกน (axial velocity) ที่ความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz 66

รูปที่ 4.12 ความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.02$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%..... 67

รูปที่ 4.13 ความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.05$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%..... 68

รูปที่ 4.14 ความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.08$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%..... 69

รูปที่ 4.15 คอนทัวร์ความเร็วแนวสัมผัส (tangential velocity) ที่ความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz 72

รูปที่ 4.16 ความเร็วแนวรัศมีของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.02$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%..... 73

รูปที่ 4.17 ความเร็วแนวรัศมีของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.05$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%..... 74

รูปที่ 4.18 ความเร็วแนวรัศมีของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.08$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%..... 75

รูปที่ 4.19 คอนทัวร์ความเร็วแนวรัศมี (radial velocity) ที่ความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz 78

รูปที่ 4.20 คอนทัวร์ความดันสถิต (static pressure) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz 80

รูปที่ 4.21 เวกเตอร์ของความเร็วในไซโคลน (velocity vectors) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz 83

- รูปที่ 4.22** สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.02$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%... 84
- รูปที่ 4.23** สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.05$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%... 85
- รูปที่ 4.24** สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.08$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%... 86
- รูปที่ 4.25** คอนทัวร์สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (solid volume fraction) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz 88
- รูปที่ 4.26** ไซโคลนต้นแบบจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (ซ้าย) ไซโคลนสแตมาน (ขวา) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10%..... 92
- รูปที่ 4.27** ผลการทดลองเทียบกับผลจากการจำลองของความดันลด (pressure drop) ที่ความเร็วทางเข้าต่างๆ (L/min)..... 93

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัดส่วนและขนาดของไซโคลนมาตรฐาน.....	9
ตารางที่ 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของไซโคลน	10
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) ของไซโคลนสแตมาน Cyclone I และ Cyclone II	27
ตารางที่ 3.2 ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองใน ANSYS Fluent 17.2 (ส่วนที่หนึ่ง)	31
ตารางที่ 3.3 ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองใน ANSYS Fluent 17.2 (ส่วนที่สอง).....	32
ตารางที่ 3.4 กลุ่มของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent models).....	37
ตารางที่ 3.5 การออกแบบการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของ Cyclone I และ Cyclone II เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม	39
ตารางที่ 3.6 การออกแบบการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของ Cyclone I และ Cyclone II เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม (ต่อ).....	41
ตารางที่ 4.1 ค่าของความดันลด และ ประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลนสแตมานและไซโคลนรูปร่างต่างๆ.....	89
ตารางที่ 4.2 ค่าของอนุภาคตัด (cut-off size, d_{50}) ของไซโคลนสแตมาน (cyclone I) และ ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuels) และชีวมวล (biomass) ภายใต้กระบวนการทางความร้อนและการผลิตไฟฟ้าในอุตสาหกรรมต่างๆ มักพบสารประกอบอินทรีย์ที่ในแง่ ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ (air pollution) ปะปนออกมากับแก๊สผลิตภัณฑ์หลังการเผาไหม้ จึงมีนักวิจัยพยายามหาอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการแยกแ่้าหรืออนุภาคของแข็ง (solid particle) เหล่านี้ออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ไชโคลน หรือเรียกว่าแก๊สไชโคลน [2, 4, 5] แก๊สไชโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงในการแยกอนุภาคของแข็ง (solid particle) ออกจากแก๊ส (gas) นอกจากนี้ อุปกรณ์นี้ยังมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการเก็บรวบรวมอนุภาคจากการไหลของแก๊ส-ของแข็ง (gas-solid flow) เนื่องจากไชโคลนสามารถสร้างได้ง่าย ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว มีความน่าเชื่อถือสูง และสามารถทำงานในสภาพที่มีฤทธิ์กัดกร่อนจากสิ่งแวดล้อมได้ สำหรับการทำงานของไชโคลน การหมุนที่เกิดจากแรงเหวี่ยง (centrifugal force) ที่เกิดขึ้นในทุกจุดภายในไชโคลน ส่งผลให้เกิดการแยกวัฏภาคอนุภาคของแข็ง และอนุภาคของแข็งดังกล่าวจะเคลื่อนไปที่ผนังของไชโคลน อนุภาคเหล่านี้ภายใต้อิทธิพลของความเร็วตามแนวแกนจะเคลื่อนลงไปยังที่เก็บและจะถูกรวบรวมไว้ อากาศที่สะอาดจะหมุนสวนทางออกจากไชโคลนผ่านทางออกด้านบน [6, 7] ประสิทธิภาพการทำงานของไชโคลนขึ้นอยู่กับความสมดุลในการแยกอนุภาคของแข็งและการใช้พลังงาน ดังนั้น ประสิทธิภาพการทำงานของไชโคลนอาจจะปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการลดปริมาณความดันตกและเพิ่มการคัดแยกอนุภาคของแข็งให้มีประสิทธิภาพ [8] ปัจจุบันไชโคลนเป็นเครื่องมือที่นำมาใช้แยกอนุภาคกันอย่างแพร่หลาย ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม ตั้งแต่อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเภสัชกรรม การทำเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี มิติและโครงสร้างของทางเข้าของไชโคลนเป็นประเด็นที่สำคัญในการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลภายในและประสิทธิภาพของไชโคลน มีรายงานที่ผ่านมามีการตีพิมพ์หลายรายงาน [7] ได้ทำการทดลองและจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสแตมัน เป็นไชโคลนรูปแบบหนึ่งในการออกแบบที่เหมาะสมมากที่สุด Azadi และคณะ [9] ได้นำเสนอผลของความสูงของทรงกระบอกและความยาวของท่อทางออกคิดเป็น 1.5 และ 0.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไชโคลน Lee และคณะ [10] วิเคราะห์ผลกระทบของรูปทรงกระบอก ความยาวกรวยของไชโคลน และแสดงให้เห็นว่าความดันลดรวม (pressure drop) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปรับเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างของทรงกระบอกให้เหมาะสม Misiulia และคณะ [6] พบว่า ผลของการ

เปลี่ยนแปลงความกว้างของทางเข้าจะมีนัยสำคัญมากกว่าความสูง โดยเฉพาะสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางตัด (cut-off diameter) และอัตราส่วนที่เหมาะสมของความกว้างของทางเข้าต่อความสูงของทางเข้าประมาณระหว่าง 0.5 และ 0.7 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมของพื้นที่ทางเข้า [11] อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการออกแบบรูปร่างของไซโคลน งานวิจัยนี้จึงพัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการแยกอนุภาคของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ในระบบสามมิติ ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยการปรับมุมของทางเข้า และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อของทางออกของแก๊สให้มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็งสูง พร้อมทั้งใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติพิมพ์ไซโคลนต้นแบบรูปร่างต่างๆ ใช้ทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องมือจริง และมีความสามารถในการปรับแต่งรูปร่างสูง และเปรียบเทียบผลการทดลองไซโคลนต้นแบบกับผลจากการจำลองพลศาสตร์เชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหลที่ใช้วิธีการเชิงตัวเลขและขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหล [12] โดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีสมการพื้นฐานหลักๆ 3 สมการที่ใช้ คือ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์พลังงาน และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม การเลือกใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพราะใช้งานได้ง่าย รวดเร็วและราคาถูกกว่าการทดลองจริง [13] การแก้ปัญหาของสมการเหล่านี้ด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถทำได้ด้วยการใช้โปรแกรมเฉพาะทางสำหรับการคำนวณพื้นฐานของรูปแบบการไหลที่มีความซับซ้อน ซึ่งวิธีการพื้นฐานในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลคือการแบ่งส่วนหลักของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ (Control volume) แล้วแยกพิจารณาเป็นส่วนๆ ด้วยสมการทางพีชคณิต ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นชุดของพีชคณิตในแต่ละจุดย่อยๆ ซึ่งจะสามารถแก้สมการได้ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ไป เพื่อที่จะได้มาซึ่งค่าของตัวแปรต่างๆ ในระบบ อาทิเช่น ความเร็ว ความดัน เป็นต้น หลังจากนั้นค่อยนำมารวมกันภายใต้ขอบเขตของปัญหาทั้งหมดเป็นภาพใหญ่ [14] โดยผู้วิจัยจะใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) แบบสามมิติ ทั้งนี้การคำนวณในระบบสามมิติเป็นการจำลองที่เหมือนกับกระบวนการจริงที่สุด สามารถอธิบายพฤติกรรมของของแข็งที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนแต่ละรูปร่าง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของไซโคลนให้ดีขึ้น

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (Three-Dimensional Printing Technology) เป็นเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักและเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการสร้างวัตถุขึ้นโดยผ่านวิธีการการประดิษฐ์ขั้นต่อขั้น เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม ข้อดีหลักของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ คือความสามารถในการประดิษฐ์วัตถุที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน และผลิตส่วนประกอบต่างได้ในกระบวนการเดียว มีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาประยุกต์ใช้งานในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรม

ยานยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเภสัชกรรม การก่อสร้างและออกแบบโครงสร้าง ทาง การแพทย์ รวมไปถึงอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า [15, 16] ซึ่งนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของ กระบวนการเผาไหม้ คือการพิมพ์โครงสร้างสามมิติของไซโคลน โดยใช้วัสดุหลักเป็นแท่งพลาสติกหรือ โลหะที่พันเป็นม้วน ส่งผ่านไปย้งหัวจ่ายซึ่งจะหลอมให้พลาสติกละลายก่อนนำมาพันลงบนแท่นวาง ที่ เมื่อพันออกมาแล้วจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เครื่องจะพันที่ละชั้นกระทั่งกลายเป็นโมเดล 3 มิติตาม รูปทรงที่ต้องการ การพิมพ์ชิ้นงานนี้จะใช้ PLA (Poly Lactic Acid) หรือ โพลีเมอร์ของกรดแลคติก โดยข้อดีของพลาสติกชนิดนี้คือ ทำจากธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์และ ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) ที่สังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งให้ผิวหน้าของการ พิมพ์มีคุณภาพสูง และมีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA สำหรับการพิมพ์ ABS ต้องให้ความร้อนสูงกว่าที่ ประมาณ 230 องศา รวมถึงต้องให้ความร้อนที่แทนพิมพ์ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 พัฒนาแบบจำลองของไหลเชิงคำนวณของไซโคลน และสร้างต้นแบบด้วยการพิมพ์สาม มิติ

1.2.2 ศึกษาผลของรูปร่างของไซโคลน ที่มีต่อการคัดแยกอนุภาคของแข็ง และเปรียบเทียบ ผลของความดันลดกับไซโคลนต้นแบบสามมิติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาโมเดล ภาวะดำเนินการ และภาวะขอบเขต สำหรับการจำลองกระบวนการจาก ไซโคลนมาตรฐานประสิทธิภาพสูง (Stairmand high efficiency cyclone) [9]

1.3.2 ศึกษาผลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ด้วยโมเดล ภาวะดำเนินการ และภาวะขอบเขต จาก ไซโคลนสแตมาน (Stairmand cyclone) ที่ได้ศึกษาข้างต้น [9] และเปรียบเทียบผลการจำลอง

1.3.3 ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยการพิมพ์ไซโคลนด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ด้วยพลาสติกโพลีแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และ อะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอีนส์ไตรีน (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) และเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองกระบวนการด้วย พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.1 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ การแก้ปัญหาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหล [12]

1.4.2 ไซโคลน คือ อุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊ส [2, 4, 5]

1.4.3 การคำนวณในระบบสามมิติ คือ การใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับจำลองกระบวนการในระบบสามมิติ ซึ่งเป็นวิธีที่เสมือนกระบวนการจริงที่สุด [14]

1.4.4 การพิมพ์สามมิติ คือ เทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการสร้างวัตถุขึ้นโดยผ่านวิธีการการประดิษฐ์ขั้นต่อขั้นของพลาสติกชนิดต่างๆ [15, 16]

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้แบบจำลองและภาวะการจำลองของไซโคลนสแตมานประสิทธิภาพสูง (Stairmand high efficiency cyclone) ในรูปแบบสามมิติ ที่ทำนายผลพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลนใกล้เคียงกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9]

1.5.2 ได้ไซโคลนในรูปแบบต่างๆ ที่แปลงรูปร่างจากไซโคลนสแตมานประสิทธิภาพสูง เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีขึ้น ด้วยแบบจำลองและภาวะเดียวกับข้อ 1.5.1

1.5.3 ได้ไซโคลนต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ เพื่อทำการทดลองและเปรียบเทียบผลกับการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไซโคลนสแตมานประสิทธิภาพสูงที่ได้จากข้อ 1.5.1

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบไซโคลน พฤติกรรมของการแยกอนุภาคของแข็งกับอากาศ ความรู้ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเทคนิคการพิมพ์สามมิติ

1.6.2 จำลองอุทกพลศาสตร์ของการไหลและพฤติกรรมการแยกระหว่างอนุภาคของแข็งกับอากาศในไซโคลนรูปแบบต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูง ประกอบไปด้วยผลของมุมของทางเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกด้านบนของไซโคลน โดยใช้อนุภาคของแข็งและอากาศด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ นอกจากนี้จะศึกษาผลการเปลี่ยนค่าปัจจัยป้อนเข้าต่างๆ เช่น ความเร็วทางเข้าของอากาศและอนุภาค ขนาดของอนุภาคของแข็ง และสัดส่วนของของแข็งกับอากาศ

1.6.3 พัฒนาแบบจำลองไซโคลนรูปแบบต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพการแยกของแข็งสูง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT 17.2 ในระบบสามมิติ โดยใช้ไซโคลนแบบสแตมาน ในการศึกษาพฤติกรรมการไหล ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วของอากาศและอนุภาคของแข็ง ความดันลด (pressure drop) เป็นต้น ทำการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัย Azadi และคณะ [9]

1.6.4 พิมพ์โครงสร้างไซโคลนรูปร่างต่างๆ แบบสามมิติด้วยพลาสติก PLA (polylactic acid) และพลาสติก ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) เป็นวัสดุขึ้นรูป

1.6.5 เปรียบเทียบผลการจำลองอุทกพลศาสตร์และการแยกอนุภาคของแข็งภายในไซโคลนแต่ละรูปร่าง กับผลการทดลองด้วยไซโคลนต้นแบบจากการพิมพ์สามมิติ

1.6.6 ประมวล วิเคราะห์ผลของการออกแบบไซโคลน สรุปผลการทดลอง เขียนบทความ และวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินการวิจัย และลำดับขั้นตอนการนำเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 ไซโคลน พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ข้อมูลในงานวิจัยเบื้องต้น การจำลองอุทกพลศาสตร์ของไซโคลนสแตมาน ประสิทธิภาพสูง (Stairmand high efficiency cyclone) และไซโคลนในรูปแบบต่างๆ (cyclone designs) โมเดลและภาวะสำหรับการจำลอง เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ อุปกรณ์ พลาสติกที่ใช้ขึ้นรูป และ ขั้นตอนในการทำการวิจัย

บทที่ 4 ผลการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไซโคลนสแตมานประสิทธิภาพสูงเทียบกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9] ผลของไซโคลนรูปแบบต่างๆ ผลจากการขึ้นรูปไซโคลนด้วยการพิมพ์สามมิติ และการเปรียบเทียบผลของการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองด้วยไซโคลนต้นแบบจากการพิมพ์สามมิติ

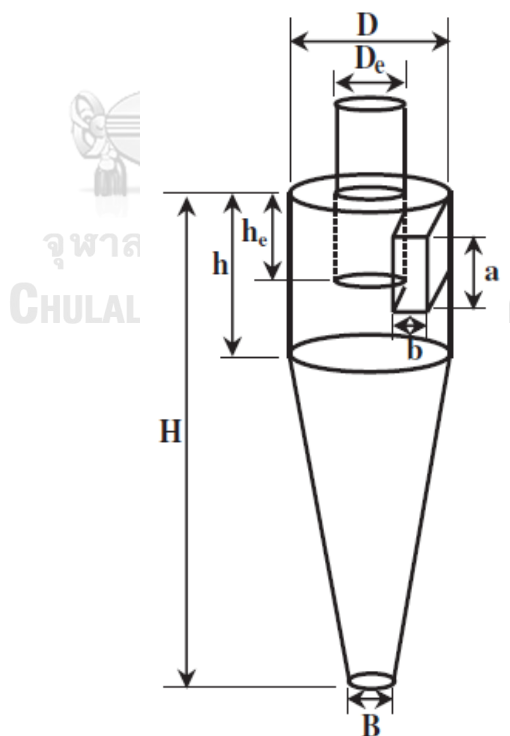
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไซโคลน

ไซโคลน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับการแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊ส ไซโคลนประกอบด้วยส่วนที่เป็นทรงกระบอก (cylindrical section) ปลายทางออกด้านล่างเป็นทรงกรวย (conical section) และทางออกด้านบนเป็นท่อทรงกระบอก (outlet dust or vortex finder) โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) และแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) ซึ่งเกิดแรงเหวี่ยงภายใน 2 ส่วนคือ Inner vortex เป็นบริเวณที่แก๊สเคลื่อนที่แยกออกจากอนุภาคของแข็ง ที่แกนกลางของไซโคลน และ outer vortex เป็นบริเวณที่มีการเคลื่อนที่ของของแข็งติดกับผนังของไซโคลน รูปแบบไซโคลนที่มีประสิทธิภาพสูงได้แก่ สแตมมานไซโคลน (Stairmand high efficiency cyclone) [9, 14] ดังแสดงรูปที่ 2.1 เป็นไซโคลนที่มีรูปแบบอย่างง่ายและมีการไหลของแก๊สเข้าตามแนวสัมผัส (Tangential entry cyclone) รวมถึงใช้เป็นไซโคลนต้นแบบสำหรับออกแบบไซโคลนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานวิจัยนี้



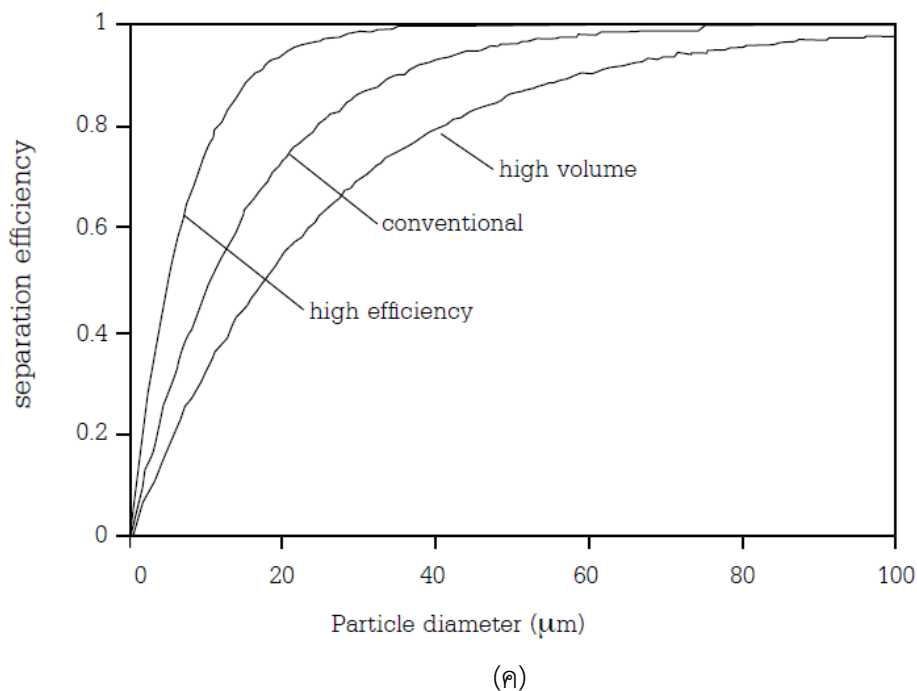
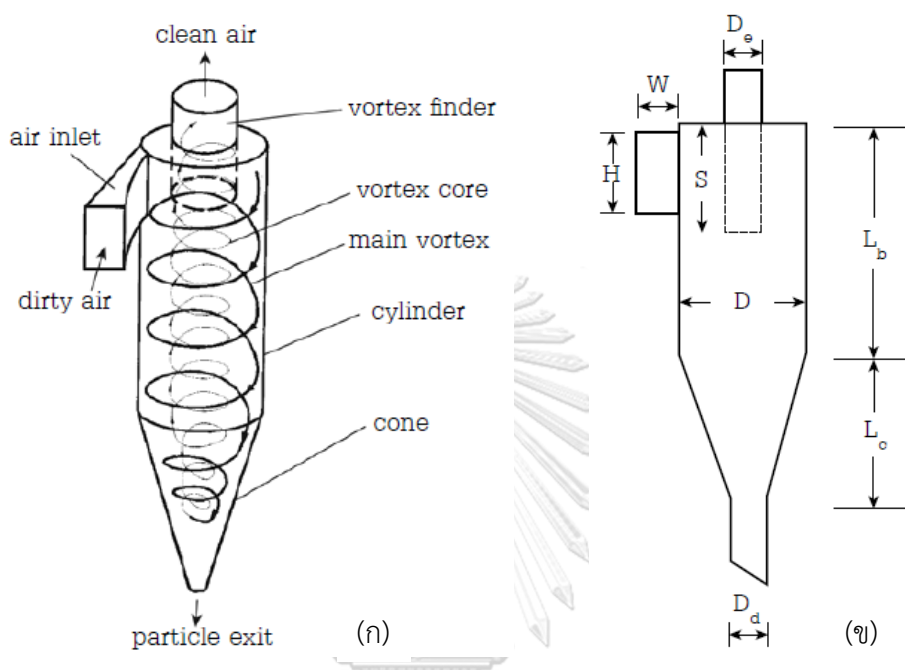
รูปที่ 2.1 สแตมมานไซโคลน (Stairmand high efficiency cyclone) [2]

2.1.1 หลักการทำงานของไซโคลน

ไซโคลน (cyclone) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมมลพิษทางอากาศสำหรับแยกอนุภาคซึ่งใช้หลักการทางกลศาสตร์ (mechanical) โดยไซโคลนใช้หลักการในการแยกอนุภาคคือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสของแก๊สเกิดการหมุนวน (vortex) ขึ้นภายในไซโคลน จึงส่งผลให้อนุภาคถูกเหวี่ยงกระทบกับผนังของไซโคลน จากนั้นอนุภาคจะตกลงด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) จึงเป็นผลให้ไซโคลนมีชื่อเรียกเป็นภาษาอังกฤษอีกหลายชื่อ เช่น cyclone collectors cyclone separators และ centrifugal separators เป็นต้น

รูปแบบตามปกติของไซโคลนโดยทั่วไป (conventional หรือ standard cyclone) จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ส่วนของทรงกระบอก (cylinder) และส่วนปลายเป็นกรวย (cone) ดังแสดงรูปที่ 2.2(ก) โดยประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคขนาดใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวไซโคลน (cyclone dimensions) เนื่องจากไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมมลพิษและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย จึงได้มีผู้ทำการศึกษาและทำการทดลองมาเป็นจำนวนมาก จนทำให้สามารถกำหนดสัดส่วนหรือขนาดของไซโคลนที่เหมาะสม เรียกว่า ขนาดไซโคลนมาตรฐาน (standard cyclone dimensions) ดังรูปที่ 2.2(ข) และตารางที่ 2.1 โดยตารางที่ 2.1 ได้แบ่งไซโคลนโดยแบ่งตามประสิทธิภาพของการแยกอนุภาค ทำให้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ไซโคลนทั่วไป (typical หรือ conventional cyclone) ไซโคลนประสิทธิภาพสูง (high efficiency cyclone) และไซโคลนอัตราการไหลสูงหรือปริมาตรแก๊สสูง (high throughput cyclone หรือ high volume cyclone) โดยประสิทธิภาพของการกักเก็บอนุภาคจะแยกตามขนาดของอนุภาค เรียกว่า ประสิทธิภาพในการกักเก็บย่อย (grade collection efficiency) ดังแสดงที่รูป 2.2(ค) พบว่า ประสิทธิภาพของไซโคลนประเภทไซโคลนทั่วไปสามารถกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตรขึ้นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ไซโคลนทั่วไปสามารถกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 ไมโครเมตรได้ประมาณ 90% แต่ถ้าเป็นกรณีของไซโคลนประสิทธิภาพสูงจะสามารถกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดเล็กถึง 5 ไมโครเมตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ไซโคลนที่มีอัตราการไหลสูงจะสามารถกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 ไมโครเมตรขึ้นไป โดยหลักการทำงานของไซโคลนเริ่มจากแก๊สจะไหลหรือเคลื่อนที่เข้าสู่ไซโคลนที่ช่องแก๊สขาเข้า (inlet) บริเวณส่วนบนของทรงกระบอกโดยไหลเข้าตามแนวสัมผัส (tangential entry cyclone) เมื่อแก๊สไหลผ่านเข้ามาในไซโคลนจะเกิดกระแสวนเรียกว่า main vortex (outer vortex) ไหลวนจากส่วนบนลงสู่ส่วนล่างของตัวไซโคลน โดยกระแสวนนี้จะเคลื่อนที่ลงไปจนเกือบถึงปลายโคนแล้วจะเกิดกระแสวนกลับ (return flow) เคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นด้านบนจะเรียกส่วนการไหลนี้ว่า core vortex (inner vortex) เมื่อ core vortex เคลื่อนที่ถึงด้านบน

ของไซโคลนจะไหลออกจากไซโคลนที่ทางออก vortex finder จากที่กล่าวมาอาจสรุปได้ว่า แก๊สที่ไหลเข้ามาในไซโคลนจะเกิดกระแสวน 2 ชั้นและเกิดในทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้อนุภาคถูกเหวี่ยงไปกระทบกับผนังของไซโคลนและตกลงสู่ด้านล่าง ส่วนแก๊สสะอาดจะไหลวนผ่านขึ้นมาจากที่ช่องทางออกด้านบนของไซโคลน



รูปที่ 2.2 (ก) การไหลของแก๊สในไซโคลน (ข) รูปร่างของไซโคลนมาตรฐาน (ค) ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนแต่ละประเภท [3]

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนและขนาดของไซโคลนมาตรฐาน

พารามิเตอร์	ประเภทไซโคลน					
	ไซโคลนประสิทธิภาพสูง		ไซโคลนทั่วไป		ไซโคลนอัตราการไหลสูง	
	(1)*	(2)**	(3)***	(4)**	(5)*	(6)**
ขนาดของตัวไซโคลน (D/D)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ความสูงของท่อทางเข้า (H/D)	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
ความกว้างของท่อทางเข้า (W/D)	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อทางออกแก๊ส (D_e/D)	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
ความยาวของท่อทางออกของแก๊ส (S/D)	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
ความยาวของส่วนทรงกระบอก (L_b/D)	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
ความยาวของส่วนกรวย (L_c/D)	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อทางออกอนุภาค (D_d/D)	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

หมายเหตุ: * ผลจากการศึกษาของ Stairmand (1951)

** ผลจากการศึกษาของ Swift (1969)

*** ผลจากการศึกษาของ Lapple (1951)

2.1.2 การออกแบบไซโคลน

การออกแบบไซโคลนจำเป็นต้องมีการเลือกโครงแบบ (configuration) เพื่อหาขนาดของไซโคลน ค่าความดันลด (pressure drop) ประสิทธิภาพในการแยกตามขนาด (collection efficiency) และรวมไปถึงพลังงานที่ต้องใช้ในระบบ ซึ่งการคำนวณหาค่าดังกล่าวจำเป็นต้องทราบอัตราการไหลของแก๊ส ส่วนประกอบอนุภาคและความหนาแน่นของแก๊ส (gas density) ปริมาณของอนุภาคของแข็งในกระแสแก๊ส ค่าจากกระบวนการดังกล่าวทำให้ได้ประสิทธิภาพของการเก็บอนุภาค ปริมาณอนุภาคของแข็งที่ปล่อยออกจากไซโคลน รวมถึงขนาดของอนุภาคด้วย เพื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบไซโคลนต่อไป

2.1.3 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อสมรรถนะของไซโคลน

มีปัจจัยหลายชนิดที่ส่งผลต่อสมรรถนะของไซโคลน ได้แก่ ลักษณะของไซโคลน ลักษณะและคุณสมบัติของแก๊ส และอนุภาคของแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของไซโคลน

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพ	ความดันลด
เพิ่มขนาดของไซโคลน	ลดลง	ลดลง
เพิ่มความยาวของส่วนทรงกระบอก และส่วนกรวย	เพิ่มขึ้น	ลดลงเล็กน้อย
เพิ่มขนาดของท่อทางออกของแก๊ส	ลดลง	ลดลง
เพิ่มพื้นที่ทางเข้าแก๊ส	ลดลง	เพิ่มขึ้น
เพิ่มความเร็ว	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
เพิ่มอุณหภูมิ	ลดลง	ลดลง
เพิ่มความเข้มข้นของอนุภาค	เพิ่มขึ้น	ยิ่งลดลง
เพิ่มขนาด และ/หรือ ความหนาแน่นของอนุภาค	เพิ่มขึ้น	ไม่มีผล

2.1.4 สมรรถนะของไซโคลน

การเกิดทฤษฎีและแบบจำลองต่างๆ สำหรับการศึกษาสมรรถนะของไซโคลนจากผู้วิจัยหลายๆ ท่าน โดยแบบจำลองของ Lapple (Lapple model) เป็นที่นิยมใช้ศึกษาสมรรถนะของไซโคลน เนื่องจากเป็นสมการที่ค่อนข้างง่ายสำหรับใช้ในคำนวณ ซึ่งขนาดอนุภาคตัด (cut-off diameter) กล่าวคือ ขนาดอนุภาคที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50% เป็นหนึ่งประสิทธิภาพที่ใช้พิจารณาสมรรถนะของไซโคลน [3, 17] แสดงดังสมการ (2.1)

$$d_{p,50\%} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e v_i (\rho_p - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$d_{p,50\%}$ คือ ขนาดอนุภาคตัดที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50%

μ คือ ความหนืดของอากาศ (ปาสคาล วินาที)

W คือ ความกว้างของท่อทางเข้าไซโคลน (เมตร)

N_e	คือ	จำนวนรอบของกระแสนในไซโคลน (รอบ)
V_i	คือ	ความเร็วของอากาศป้อนเข้าไซโคลน (เมตรต่อวินาที)
ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ρ_a	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

และจำนวนรอบของกระแสน (N_e) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.2)

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ

H	คือ	ความสูงของท่อทางเข้าไซโคลน (เมตร)
L_c	คือ	ความยาวของส่วนกรวยไซโคลน (เมตร)
L_b	คือ	ความยาวของส่วนทรงกระบอกไซโคลน (เมตร)

ประสิทธิภาพการกักเก็บหรือ ประสิทธิภาพในการแยก หาได้ดังสมการ (2.3)

$$\eta_{dp} = \frac{1}{1 + \left(d_{p,50\%} / d_p \right)^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ

η_{dp}	คือ	ประสิทธิภาพการกักเก็บ หรือการแยกของอนุภาคที่สนใจ (-)
$d_{p,50\%}$	คือ	ขนาดของอนุภาคตัดที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50% (เมตร)
d_p	คือ	ขนาดของอนุภาค (เมตร)

นอกจากนี้ ความดันลด (pressure drop) เป็นค่าที่ส่งผลต่อไซโคลนเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะบอกถึงพลังงานที่ต้องใช้สำหรับแยกอนุภาคของไซโคลน ยิ่งค่าของความดันลดมากเท่าใด พลังงานที่ต้องให้กับไซโคลนก็มากขึ้นเท่านั้น และยังรวมถึงค่าใช้จ่ายที่จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยทั่วไปแล้วค่าความดันลดของไซโคลนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักเก็บ หรือประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลนเพิ่มขึ้นด้วย การคำนวณค่าความดันลดแสดงในสมการ (2.4)

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_g V_i^2 H_v \quad (2.4)$$

เมื่อ

- ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 V_i คือ ความเร็วของอากาศป้อนเข้าไซโคลน (เมตรต่อวินาที)
 H_v คือ inlet velocity head สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.5)

$$H_v = K \left[\frac{(HW)}{D_e^2} \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ

- K คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 16 สำหรับไซโคลนที่มีทางเข้าตามแนวสัมผัส (tangential entry cyclone หรือ tangential inlet)
 D_e คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกของแก๊ส (เมตร)
 H คือ ความสูงของท่อทางเข้าไซโคลน (เมตร)
 W คือ ความกว้างของท่อทางเข้าไซโคลน (เมตร)

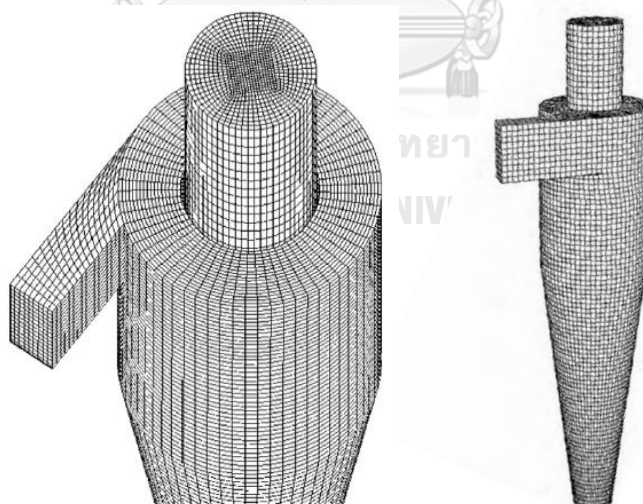
2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, หรือเรียกสั้นๆ ว่า CFD) เป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) ที่ใช้วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical methods) และขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหล [12, 18] โดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีสมการพื้นฐาน (Governing equation) หลักๆ 3 สมการที่ใช้ คือ สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation) ซึ่งปัจจุบันมีการเลือกใช้งานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มากขึ้นเพราะใช้งานได้ง่าย รวดเร็ว ราคาถูกกว่าการทดลองจริง ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบ ปลอดภัยจากอันตรายที่จะเกิดจากการทดลอง และสามารถเห็นพฤติกรรมของการไหลของของไหลต่างๆภายในอุปกรณ์ [13, 19] เป็นผลให้สามารถนำมาปรับปรุง และดัดแปลงรูปแบบในการออกแบบได้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีและน่าพึงพอใจ ก่อนตัดสินใจนำไปสร้างจริงเพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยขั้นตอนการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้สร้างขึ้นเพื่อแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล ที่มีเงื่อนไขขอบเขตและรูปร่างของปัญหาที่จะกำหนดได้โดยสะดวก โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอน

ก่อนการคำนวณ (pre-processor) ขั้นตอนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา (analysis) และขั้นตอนหลังการคำนวณ (post-processor)

2.2.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

ขั้นตอนแรกของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือการสร้างพื้นที่ให้กับกระบวนการไหล หรือเรียกว่าการสร้างโดเมนการคำนวณ (computational domain) โดยโดเมนสำหรับการคำนวณจะถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรขนาดเล็ก เรียกว่า ปริมาตรควบคุม (control volume) ดังแสดงที่รูป 2.3 ซึ่งเป็นบริเวณที่จะคำนวณเพื่อได้ผลลัพธ์ของการไหล เช่น ความเร็ว ความดัน เป็นต้น ก่อนการจำลองกระบวนการต้องทดสอบความเหมาะสมของจำนวนปริมาตรควบคุม grid independent test เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องและแม่นยำ ถ้าจำนวนปริมาตรควบคุม (grid) น้อยเกินไป ก็ส่งผลให้ผลเฉลยมีความคลาดเคลื่อนสูง และหากปริมาตรควบคุมมีจำนวนมาก ก็จะได้ผลเฉลยที่มีความถูกต้องและแม่นยำมาก แต่จะส่งผลถึงการใช้ทรัพยากรในการคำนวณและจะใช้เวลาในการคำนวณที่มากขึ้นตามไปด้วย เมื่อได้ปริมาตรควบคุม หรือ mesh cell ที่เหมาะสมแล้ว จึงกำหนดสมบัติที่จะใช้ในการจำลอง เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ขนาดของอนุภาคของแข็ง เป็นต้น กำหนดทิศทางเข้า-ออก และผนังของระบบ จากนั้นตั้งภาวะขอบเขตของการคำนวณ (boundary conditions) ให้สอดคล้องกับการดำเนินการจริงในการทดลอง



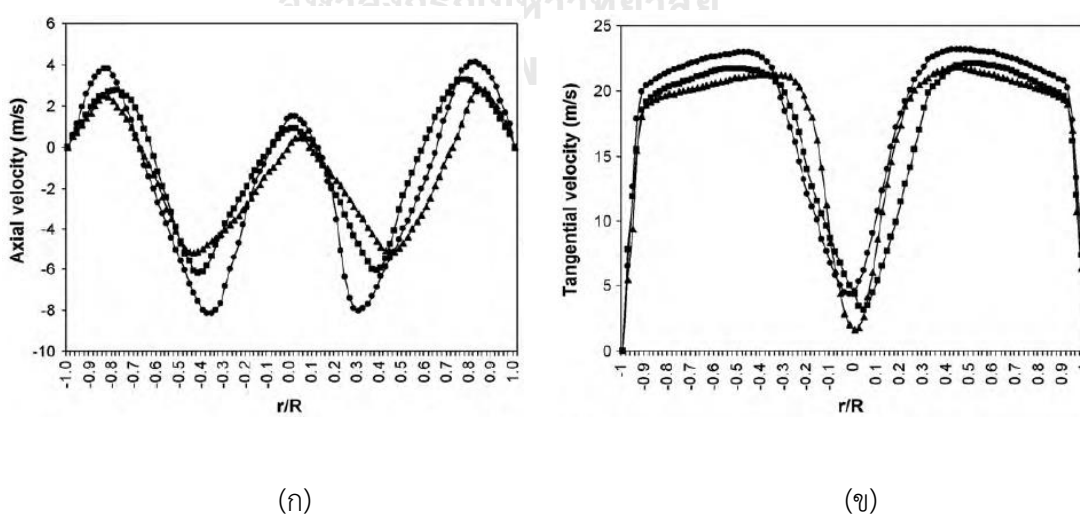
รูปที่ 2.3 โดเมนสำหรับการคำนวณ (computational domain) และปริมาตรควบคุม (control volume) [2, 4]

2.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา (Analysis)

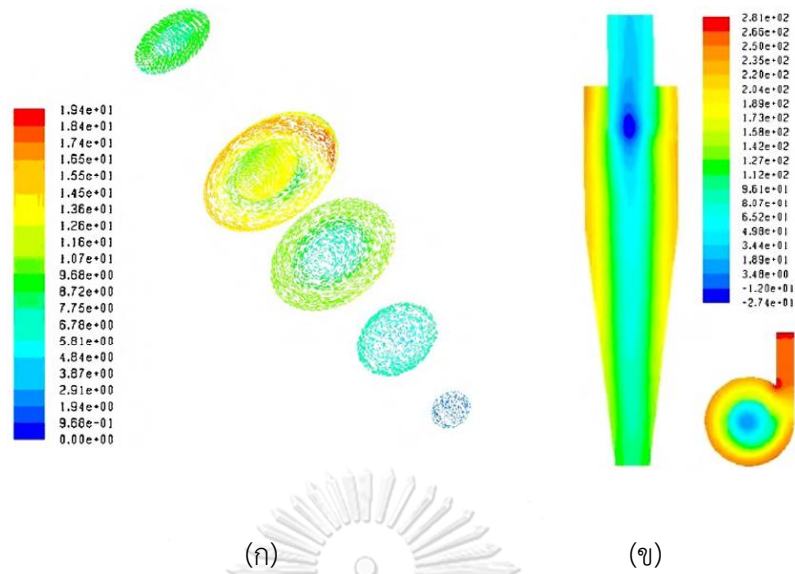
ขั้นตอนการวิเคราะห์และแก้ปัญหาถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับโปรแกรมการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เมื่อทำการกำหนดโดเมนการคำนวณและตั้งภาวะขอบเขตแล้ว ชุดสมการทางคณิตศาสตร์จะถูกแทนเข้าไปในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นสมการที่คอมพิวเตอร์ให้ผลเฉลยและต้องแปลงสมการทางคณิตศาสตร์ในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลที่มีความซับซ้อนให้เป็นสมการทางพีชคณิต (algebraic equations) เพื่อให้เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถคำนวณรูปแบบการไหลได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณซ้ำ (iterate) เพื่อให้ผลลัพธ์ในการคำนวณของชุดสมการมีค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละรอบของจำนวนซ้ำอยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้ (residual)

2.2.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor)

เมื่อได้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา จะสร้างผลลัพธ์เหล่านี้ออกมาในรูปแบบกราฟิก เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยเฉพาะการไหลในระบบสามมิติ สามารถแสดงได้หลายรูปแบบ เช่น การสร้างกราฟเส้น (linear plot) ดังแสดงที่รูป 2.4 การสร้างรูปเวกเตอร์ (vector plot) ดังแสดงที่รูป 2.5(ก) การสร้างรูปคอนทัวร์ (contour plot) ดังแสดงที่รูป 2.5(ข) เส้นทางการเดินของอนุภาค (particle tracking) ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในหลายทิศทาง และสามารถแสดงการไหลของของไหลในรูปแบบการเคลื่อนไหว (fluid motion) เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการไหลภายในอุปกรณ์ต่างๆ



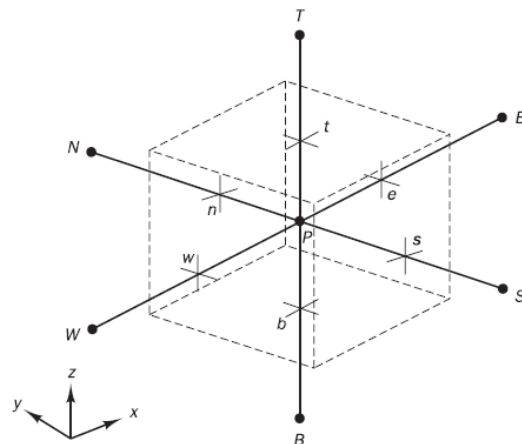
รูปที่ 2.4 (ก) กราฟเส้นของความเร็วในแนวแกน (axial velocity) และ (ข) ความเร็วแนวสัมผัส (tangential velocity)



รูปที่ 2.5 (ก) รูปแบบเวกเตอร์ของความเร็ว (ข) รูปคอนทัวร์ของความดัน

2.3 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization) [20]

การแบ่งโดเมนคำนวณ (computational domain) ของการไหลให้อยู่ในปริมาตรควบคุม (control volume) เพื่อให้สามารถใช้ฟังก์ชันอย่างง่าย (simple functions) เข้าไปแทนลักษณะของการไหลในปริมาตรควบคุมนั้นๆ โดยการเปลี่ยนสมการควบคุมพื้นฐาน (governing equation) เป็นสมการพีชคณิต (algebraic equation) เพื่อแก้ปัญหา ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) เป็นการเปลี่ยนสมการโดยใช้หลักการด้านพลศาสตร์ของไหลเพื่อให้ปัญหาอยู่ในปริมาตรควบคุม ระเบียบวิธีนี้มักนำมาใช้แก้ปัญหาที่เป็นของไหล ซึ่งจะเป็นบริเวณที่สนใจภาวะขอบเขต (boundary conditions) ที่มีการเปลี่ยนแปลงมวล พลังงาน และโมเมนตัม [19] รูปที่ 2.6 แสดงปริมาตรควบคุมในระบบสามมิติ



รูปที่ 2.6 ปริมาตรควบคุมและตำแหน่งที่สนใจในระบบสามมิติ

ที่ภาวะที่มีแต่การแพร่ (diffusion) ในระบบสามมิติ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.1)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S = 0 \quad (2.1)$$

สำหรับกริด (grid) ในระบบสามมิติจะใช้หลักการแบ่งย่อยโดเมนคำนวณ (computational domain) โดยตัวอย่างปริมาตรควบคุม (control volume) แสดงดังรูปที่ 2.5 เซลล์จะประกอบด้วยจุด P (node P) และมีอีก 6 จุดรอบๆจุด P โดยที่แต่ละจุดจะแสดงตัวในทิศทางต่างๆ รอบจุด P คือ west east south north bottom และ top และแทนจุด (node) ต่างๆ เหล่านี้ด้วยตัวอักษรดังนี้ตามลำดับ (W E S N B และ T) ตำแหน่งก่อนจุด (node) ต่างๆ จะแทนด้วย w e s n b และ t ซึ่งคือตำแหน่งบนพื้นผิวของ west east south north bottom และ top ตามลำดับ [21]

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.1) ตลอดปริมาตรควบคุม (control volume)

$$\left[\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] + \left[\Gamma_t A_t \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t - \Gamma_b A_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b \right] + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (2.2)$$

แทนค่าผลต่างและจัดรูปแบบของสมการ (2.2) ได้ดังนี้

$$\left[\Gamma_e \frac{(\phi_E - \phi_P) A_e}{\delta x_{PE}} - \Gamma_w \frac{(\phi_P - \phi_W) A_w}{\delta x_{WP}} \right] + \left[\Gamma_n \frac{(\phi_N - \phi_P) A_n}{\delta y_{PN}} - \Gamma_s \frac{(\phi_P - \phi_S) A_s}{\delta y_{SP}} \right] + \left[\Gamma_t \frac{(\phi_T - \phi_P) A_t}{\delta z_{PT}} - \Gamma_b \frac{(\phi_P - \phi_B) A_b}{\delta z_{BP}} \right] + (S_u + S_p \phi_P) = 0 \quad (2.3)$$

สามารถเขียนสมการแบ่งช่วงสำหรับโครงสร้างระบบสามมิติอย่างง่ายได้ด้วยสมการที่ (2.4)

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + a_B \phi_B + a_T \phi_T + S_u \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$a_W = \frac{\Gamma_w A_w}{\delta_{x_{WP}}} \quad (2.4ก)$$

$$a_E = \frac{\Gamma_e A_e}{\delta_{x_{PE}}} \quad (2.4ข)$$

$$a_S = \frac{\Gamma_s A_s}{\delta_{y_{SP}}} \quad (2.4ค)$$

$$a_N = \frac{\Gamma_n A_n}{\delta_{y_{PN}}} \quad (2.4ง)$$

$$a_B = \frac{\Gamma_b A_b}{\delta_{z_{BP}}} \quad (2.4จ)$$

$$a_T = \frac{\Gamma_t A_t}{\delta_{z_{PT}}} \quad (2.4ฉ)$$

จากการพิจารณาข้างต้น ถือเป็นจุดที่สนใจสำหรับการตรวจสอบความสำคัญทางกายภาพของค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ สำหรับสมการการแบ่งช่วง (discretization equation) โดยค่าสัมประสิทธิ์รอบจุดศูนย์กลาง (center point, P) คือ a_E a_W a_N a_S a_T และ a_B จะสามารถเป็นสื่อนำความร้อนระหว่างจุด P (center point) และจุดรอบๆ ในส่วนค่าสัมประสิทธิ์จุดกลาง a_P คือผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์รอบๆ (a_E a_W a_N a_S a_T และ a_B) และค่าคงที่จาก source term

วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLEC

ระเบียบวิธี SIMPLEC หรือ SIMPLE-Consistent ขั้นตอนวิธีการเหมือนกับการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE แตกต่างกันในส่วนของสมการโมเมนตัม (momentum equation) ซึ่งถูกปรับให้เหมาะสมในการทำงานมากขึ้น โดย SIMPLEC จะมองข้ามส่วนของ velocity correction เนื่องจากส่งผลทางนัยสำคัญน้อยกว่าวิธีแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE

สมการ u-velocity correction ของ SIMPLEC แสดงดังสมการ (2.5)

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j} - \sum a_{nb}} \quad (2.6)$$

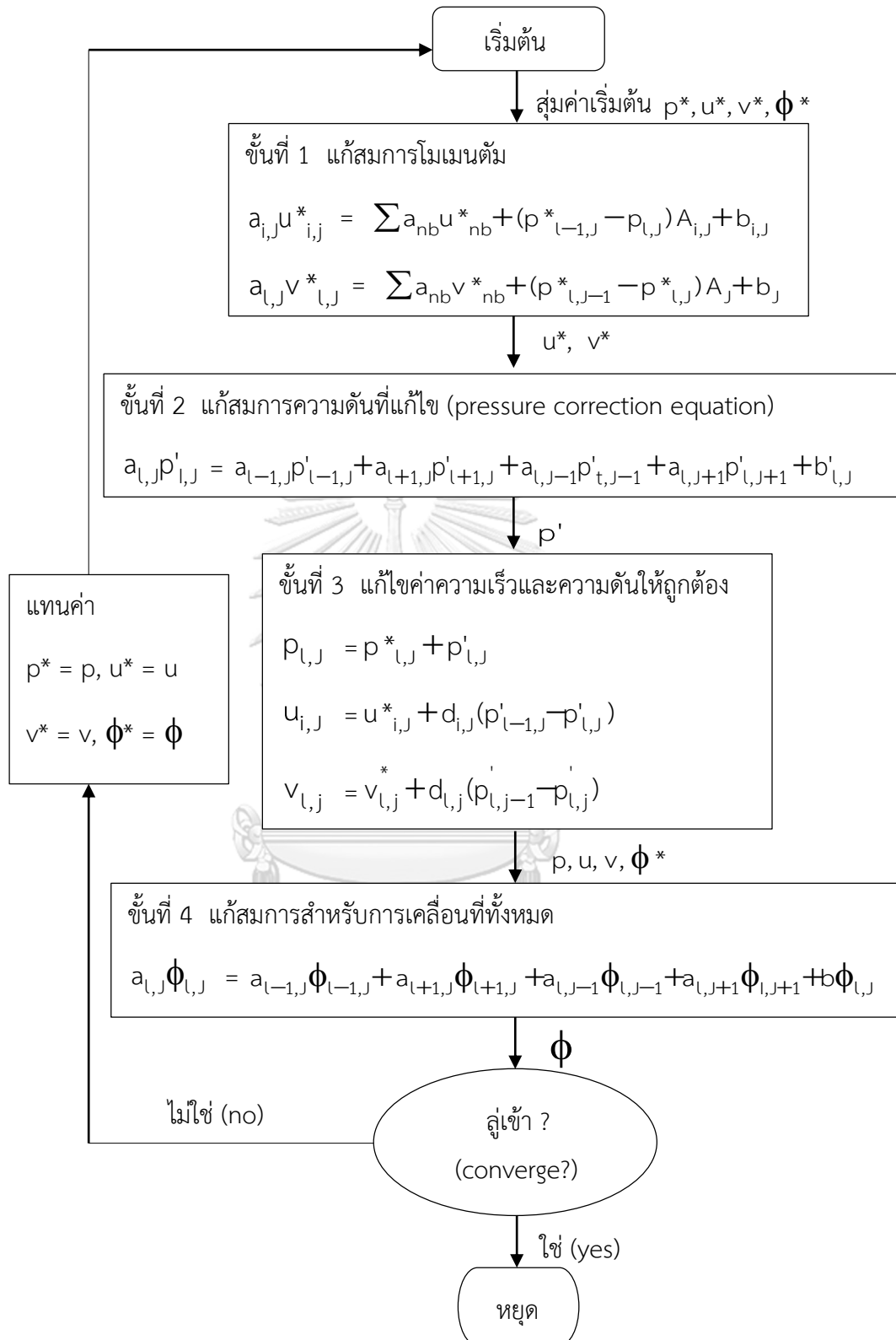
ในทำนองเดียวกันสมการ v-velocity correction จะเขียนได้ดังสมการ

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j} - \sum a_{nb}} \quad (2.8)$$

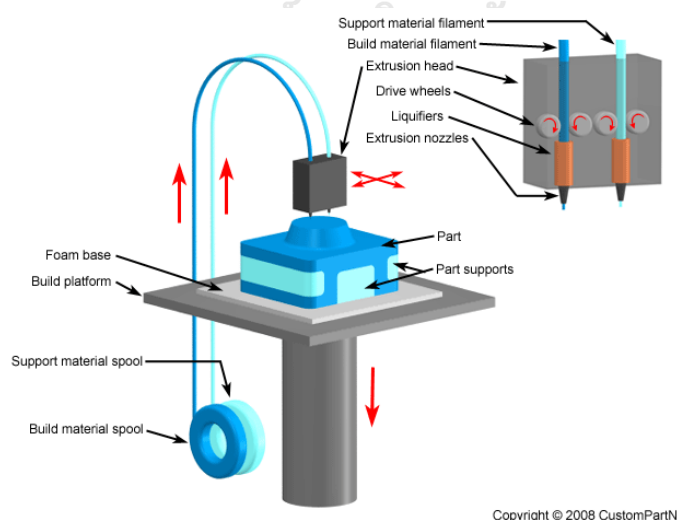
การแบ่งช่วงสำหรับสมการ pressure correction ใช้วิธีการเดียวกับวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE ยกเว้น d-term จะต้องคำนวณจากสมการที่ (2.6) และ (2.8) โดยลำดับขั้นตอนวิธีคิดแบบ SIMPLEC จะเหมือนกับวิธีคิดแบบ SIMPLE ดังแสดงในรูปที่ 2.7 วิธีการคิดแบบ SIMPLE ให้กระบวนการในการคำนวณค่าความเร็วและความดัน ด้วยวิธีการทำซ้ำ (iteration) และเมื่อคำตอบคู่เข้าการคำนวณจะสิ้นสุดลง



รูปที่ 2.7 วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE

2.4 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (Three-Dimensional Printing Technology) เป็นเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักและเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการสร้างวัตถุขึ้นโดยผ่านวิธีการประดิษฐ์ชั้นต่อชั้น เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม เครื่องพิมพ์สามมิตินี้อยู่หลายประเภทด้วยกัน แต่หลักการพื้นฐานก็คือการวาง layer ของวัตถุซ้อนกันหลายๆชั้นจนกลายเป็นชิ้นงานที่ต้องการ ดังแสดงที่รูป 2.8 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ที่แพร่หลายที่สุดคือการพิมพ์แบบ FDM (Fused Deposition Modeling) ซึ่งใช้วิธีละลายเส้นเทอร์โมพลาสติกด้วยความร้อนและฉีดออกมาจัดวางตามตำแหน่งที่ต้องการทีละชั้นแล้วเทอร์โมพลาสติกจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ขึ้นรูปเป็นวัตถุที่เราต้องการผลิต ข้อดีหลักของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ คือ ความสามารถในการประดิษฐ์วัตถุที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและผลิตส่วนประกอบต่างๆ ได้ในกระบวนการเดียว มีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาประยุกต์ใช้งานในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเภสัชกรรม การก่อสร้างและออกแบบโครงสร้าง ทางการแพทย์ รวมไปถึงอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า [16, 22] ซึ่งงานวิจัยนี้นำมาใช้ผลิตองค์ประกอบหนึ่งของกระบวนการเผาไหม้ คือ ไซโคลน การพิมพ์ชิ้นงานนี้ใช้เส้นเทอร์โมพลาสติกบรรจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ของ PLA (Poly Lactic Acid) ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) และ PVA (polyvinyl alcohol) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถละลายได้ด้วยน้ำ สำหรับทำตัวรองรับหรือหมอนรอง (support) ชิ้นงานในส่วนที่เอียงมากกว่า 45° และส่วนที่ลอยอยู่ในอากาศที่ไม่สัมผัสกับแท่นพิมพ์ เพื่อป้องกันการย้อยของพลาสติกในขณะพิมพ์



รูปที่ 2.8 การวาง layer ของวัตถุซ้อนกันหลายๆ ชั้นจนกลายเป็นชิ้นงาน [1]

2.4.1 การฉีควัสดุผ่านหัวฉีด

การฉีควัสดุผ่านหัวฉีดเป็นเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติที่มีการใช้งานกันมากที่สุดโดยอาศัยหลักการฉีควัสดุกึ่งเหลวผ่านหัวฉีดออกมาจัดตำแหน่งที่ละชั้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานออกมา วัสดุที่นำมาใช้มีหลากหลาย เช่น คอนกรีต เซรามิก โลหะ หรือแม้กระทั่งใช้ช็อกโกแลตในการขึ้นรูปอาหาร แต่วัสดุพวกเทอร์โมพลาสติกได้รับความนิยมสูงสุดในการเลือกใช้งาน ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนพลาสติกจะอ่อนตัวและไหลผ่านหัวฉีดได้

การฉีควัสดุพวกเทอร์โมพลาสติก [23] หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การสร้างแบบจำลองด้วยการรวมวัสดุหลอม (fused deposition modeling หรือ FDM) นอกจากนี้แล้วยังมีการเรียกเทคโนโลยีนี้ อีกในชื่อว่า Fused filament modeling (FFM) หรือการผลิตด้วยการหลอมเส้นใย (Fused filament fabrication หรือ FFF) หรือการพอกพูนวัสดุหลอม (Fused deposition method) เมื่อพิมพ์ชั้นแรก วัสดุที่ถูกฉีดออกมาจะติดอยู่กับแท่นพิมพ์ (build platform หรือ print bed) จากนั้นเทอร์โมพลาสติกจะเย็นตัวอย่างรวดเร็วและแข็งตัวในขณะที่หัวพิมพ์เคลื่อนที่เพื่อสร้างวัตถุในสองมิติที่ละชั้น โดยเครื่องพิมพ์ในลักษณะนี้หัวพิมพ์จะเคลื่อนที่ในแนวเหนือ-ใต้ ตะวันออก-ตะวันตก ในส่วนแท่นพิมพ์จะเคลื่อนที่ขึ้น-ลง เพื่อสร้างชิ้นในการพิมพ์คือเมื่อพิมพ์เสร็จชั้นหนึ่ง แท่นพิมพ์จะเคลื่อนตัวลงมาทีละนิด เพื่อให้เกิดการพิมพ์ซ้อนกับชั้นที่พิมพ์ก่อนหน้านี้ โดยจะเกิดกระบวนการดังกล่าวนี้ซ้ำๆ จนกว่าจะได้ชิ้นงานสามมิติที่ได้ออกแบบไว้

เทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติคือ ซึ่งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ตัวอย่างของชิ้นงานที่สร้างจาก ABS เช่น หมวกนิรภัยสำหรับจักรยานยนต์ ปากกาลูกกลิ้ง และตัวต่อเลโก้ เป็นต้น และ PLA (Polylactic Acid) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้จาก

ผลผลิตทางการเกษตร เช่น แป้ง ข้าวโพด และอ้อย จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ABS รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะม้วนพลาสติกสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 2.9 ลักษณะของม้วนพลาสติก PLA และ ABS สำหรับการพิมพ์สามมิติ [1]

2.4.2 ข้อจำกัดของการฉีดเทอร์โมพลาสติก

แม้ว่าการฉีดเทอร์โมพลาสติกที่ได้รับการรับรองสำหรับใช้ในการพิมพ์สามมิติจะสามารถสร้างชิ้นงานทั้งขนาดเล็กและใหญ่ และใช้งานได้ง่าย แต่ก็ยังมีข้อจำกัดต่างๆ ที่ควรระวังและต้องตระหนักดังนี้ ข้อแรก ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการฉีดด้วยเทอร์โมพลาสติกจะมีลักษณะเป็นชั้น จะเป็ นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ใช้ในการฉีดและความแม่นยำของเครื่องพิมพ์ ในปัจจุบันชิ้นงานที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติก็ยังมีผิวที่หยาบอยู่โดยอาจใช้การขัดผิวหรือใช้สารเคมีด้วยการอบไอแอสีโตนหลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จเพื่อทำให้ผิวของชิ้นงานเรียบมากขึ้น นอกจากนี้การพิมพ์ด้วยเทอร์โมพลาสติกยังอาจเกิดการโค้งงอของตัวชิ้นงานในระหว่างการพิมพ์ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัสดุที่เพิ่งผ่านหัวฉีด และวัสดุที่เย็นตัวลงแล้วบนแท่นพิมพ์ การลดผลกระทบจากความแตกต่างของอุณหภูมิคือการกำหนดให้แท่นพิมพ์อุ่นอยู่ตลอดเวลา เพื่อเป็นการลดการเย็นตัวของวัสดุชิ้นแรกๆ หรือการลดปัญหาการโค้งงออีกประการหนึ่งคือการฉีดพลาสติกออกมาอย่างช้าๆ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิมพ์ในชั้นแรกๆ หรือการสร้างแพ (raft) ก่อน การพิมพ์ชิ้นงานชั้นแรก เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของชิ้นงานกับแท่นพิมพ์และลดการโค้งงอ นอกจากนี้ การออกแบบชิ้นงานเช่น ออกแบบชิ้นงานให้มีลักษณะโปร่ง สามารถลดการโค้งงอได้อีกทางหนึ่ง ข้อจำกัดสุดท้ายคือความจำเป็นในการสร้างตัวรองรับหรือหมอนรองชิ้นงานที่มีลักษณะยื่นออกมาหรือห้อยอยู่กลางอากาศ ในขณะที่พิมพ์ชิ้นงาน โดยการสร้างตัวรองรับสามารถทำได้สองวิธีคือ ใช้พลาสติกชนิดเดียวกับชิ้นงาน

เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย โดยสามารถเอาตัวกรองรับออกได้โดยการหักหรือตัดออกหลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จ จากนั้นอาจใช้กระดาษทรายขัดเพื่อให้ผิววัตถุเรียบเนียน วิธีที่สอง ใช้ตัวกรองรับหรือหมอนรองเป็นวัสดุต่างชนิดกับชิ้นงาน ซึ่งที่นิยมใช้งานคือ PVA เพราะสามารถละลายน้ำออกได้ แต่เครื่องพิมพ์จำเป็นต้องมีสองหัวฉีด วิธีนี้เมื่อพิมพ์ชิ้นงานเสร็จสามารถละลายตัวกรองรับออกได้โดยง่าย และสามารถนำชิ้นงานไปใช้ได้ทันที

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brar และคณะ [4] ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวทรงกระบอกและกรวยของไซโคลน ต่อประสิทธิภาพการทำงานและความเร็วด้วยไซโคลน 10 รูปแบบที่แตกต่างกัน พบว่า การเพิ่มความยาวทรงกระบอก 5.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน ที่ความเร็วขาเข้าเป็น 16.1 เมตร/วินาที จะช่วยลดการสูญเสียความดันประมาณ 34% และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยก (collection efficiency) ประมาณ 9.5% และการเพิ่มความยาวกรวยเป็น 6.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน แสดงให้เห็นการสูญเสียความดัน 29% และประมาณ 11% ในการเพิ่มประสิทธิภาพการแยก การเพิ่มขึ้นของความยาวส่วนกระบอกทำให้ความดันลด (pressure drop) ลดลงและมีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเพิ่มความยาวส่วนกรวยมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าความดันลด ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความยาวทั้งส่วนทรงกระบอกและส่วนกรวยทำให้ turbulence intensity ลดลง

Misiulia และคณะ [6] ศึกษาผลของมุมทางเข้าต่อรูปแบบของการไหลและความดันลดโดยใช้ไซโคลนห้าแบบที่มีทางเข้าเป็นเกลียวที่มีมุมแตกต่างกัน และไซโคลนอีกห้าแบบที่ทางเข้ามีความสูงต่างกันที่มีมิติเดียวกันกับทางเข้าที่เป็นเกลียว พบว่าความเร็วสูงสุดในแนวสัมผัสภายในไซโคลนลดลงถ้าทางเข้าของไซโคลนเป็นแบบเกลียวและมีการเพิ่มความสูงของทางเข้าแต่ทำให้ประสิทธิภาพการแยกลดลง นอกจากนี้การเพิ่มมุมทางเข้าจะช่วยลดอัตราการไหลของแก๊สที่ผ่านเข้าไปในไซโคลนในแนวแกน เป็นผลให้เกิดการสูญเสียความดันที่ต่ำ แต่จะลดความสามารถในการแยกอนุภาคของไซโคลน การเพิ่มมุมของทางเข้าเป็นผลให้ความเร็วในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นและอนุภาคของแข็งจะเกิดการเคลื่อนที่ไปตามตัวไซโคลน เมื่อเทียบกับไซโคลนที่ทางเข้าไม่มีมุมซึ่งมีความเร็วในแนวรัศมีน้อยกว่า ถ้าเพิ่มมุมของทางเข้ามากๆ สำหรับทางเข้าที่เป็นเกลียวพบว่าความดันลดภายในไซโคลนลดลงเนื่องจากเกิดการสูญเสียความดันในส่วนไซโคลนต่ำ ไซโคลนที่มีทางเข้าเป็นเกลียวจะมีอุทกพลศาสตร์ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไซโคลนที่มีทางเข้าแบบปกติและมีประสิทธิภาพสูงถ้ามีมุมของทางเข้าเป็น 20 องศา

Azadi และคณะ [9] ศึกษาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลสามมิติของแก๊สภายในไซโคลนที่มีขนาดแตกต่างกัน Cyclone I Cyclone II และ Cyclone III โดย Cyclone I มีขนาดใหญ่ที่สุด และ Cyclone III มีขนาดเล็กที่สุด ผลของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Reynolds stress model (RSM) ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนไปจากการทดลองเพียง 2.3% 3.4% และ 3.6% สำหรับ Cyclone I II และ III ตามลำดับ มีการยืนยันว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RSM มีความแม่นยำสูงกว่าแบบจำลอง RNG k- ϵ ผลการจำลองเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนแล้วความดันลดจะเพิ่ม ความดันลดที่เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของไซโคลนเพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณส่วนกลางของไซโคลนเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำ และ ความดันสถิต (static pressure) จะเพิ่มขึ้นในแนวรัศมีจากส่วนกลางไปยังผนังไซโคลน จึงเป็นผลให้ Cyclone I มีความดันลด (pressure drop) สูงสุดเพราะมีขนาดใหญ่ที่สุด

Lee และคณะ [2] ศึกษาแบบจำลองการไหลและประสิทธิภาพการแยกของไซโคลนชนิดที่มีขนาดของความยาวส่วนกรวยเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับความยาวส่วนกรวยของไซโคลนแบบธรรมดา โดยแบบจำลองการไหล 3 มิติ นั้นได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FLUENT เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้มาจากการวิเคราะห์โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ Lagrangian อีกทั้งยังได้มีการทดสอบรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนด้วย ผลการวิเคราะห์ที่ยืนยันว่ามีเพียง second-order Reynolds stress model เท่านั้นที่ให้ผลลัพธ์ของรูปแบบการไหลอย่างสมเหตุสมผล นอกจากนี้ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปร่างในส่วนของ core-annulus interface มีความสำคัญต่อรูปแบบการไหลและประสิทธิภาพการแยก ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า short-circuiting ของการไหลจากทางเข้าไปออก vortex finder และความดันลด สามารถปรับให้ลดลงได้ด้วยการปรับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ cylinder ให้เหมาะสม

Bernardo และคณะ [14] ศึกษามุมทางเข้าของไซโคลนด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามมิติ computational fluid dynamics (CFD) ด้วยแบบจำลอง RSM เพื่ออธิบายการไหลของแก๊ส-ของแข็ง (gas-solid) ในไซโคลนที่มีการเคลื่อนที่ผ่านทางเข้าของท่อที่มีมุมแตกต่างกันสามมุมที่มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของไซโคลน และผลของมุมของทางเข้าต่ออุทกพลศาสตร์ของไหลภายในไซโคลนและพารามิเตอร์ประสิทธิภาพ (ประสิทธิภาพการแยกและความดันลด) ผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพการแยกในงานนี้เพิ่มขึ้นเป็น 77.2% สำหรับที่มุม 45 องศาเข้า ในขณะที่ท่อทางเข้าแบบปกติคิดเป็น 54.4% ภายใต้ภาวะเดียวกัน พบว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลนที่มีทางเข้าแบบปกติมี residence time มากกว่าไซโคลนแบบอื่นๆ สำหรับทางเข้าไซโคลนที่มีมุมเอียงเพิ่มขึ้นจากมุมเอียง 30 45 60 จะมี residence time น้อยลงคือเวลาที่อนุภาคอยู่ในไซโคลนน้อยลง ด้วยเหตุผลนี้ในกรณีที่มีระดับพลังงานต่ำจึงจำเป็นต้องลดความดันลด

(pressure drop) ซึ่งการเพิ่มมุมของทางเข้าจะทำให้ความดันลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการแยกดีขึ้น

Wang และคณะ [10] ศึกษาวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) ของการไหลของระบบแก๊ส-ของเหลว-ของแข็ง ใน dense medium cyclones (DMCs) ที่มีขนาดของไซโคลนที่แตกต่างกัน ส่วนวิธีการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค ใช้รูปแบบการไหลของอนุภาคถ่วงหินในการจำลอง ซึ่งจากการจำลอง พบว่า ขนาดของทางออกด้านบนของไซโคลน เป็นส่วนที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพของไซโคลน โดยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของไซโคลนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอนุภาคจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดต่ำสุด นอกจากนี้ส่วนของโครงสร้างไซโคลน ทั้งช่วงที่เป็นทรงกระบอกและทรงกรวยที่ยาวขึ้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และเล็กออกจากกัน โดยปกติความยาวของทรงกระบอกไม่มีนัยสำคัญต่อผลของการแยกอนุภาค ยกเว้น อนุภาคที่มีขนาดใหญ่มาก เพราะอนุภาคสามารถดิ่งกลับไปชนกับผนังภายในไซโคลนส่วนที่เป็นทรงกระบอกในช่วงสั้น สำหรับการปรับความยาวของส่วนกรวยเป็นวิธีที่ดีที่จะเพิ่มความสามารถในการแยกอนุภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความยาวในส่วนกรวย นอกจากนี้พบว่าขนาดของทางเข้าไซโคลนมีความสำคัญต่อพฤติกรรมไหลของอนุภาค โดยค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอนุภาคและบริเวณที่เห็นอนุภาคแยกส่วนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดของทางเข้าลดลงและการเพิ่มขนาดของทางเข้ามีนัยสำคัญต่ออนุภาคขนาดเล็ก



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น

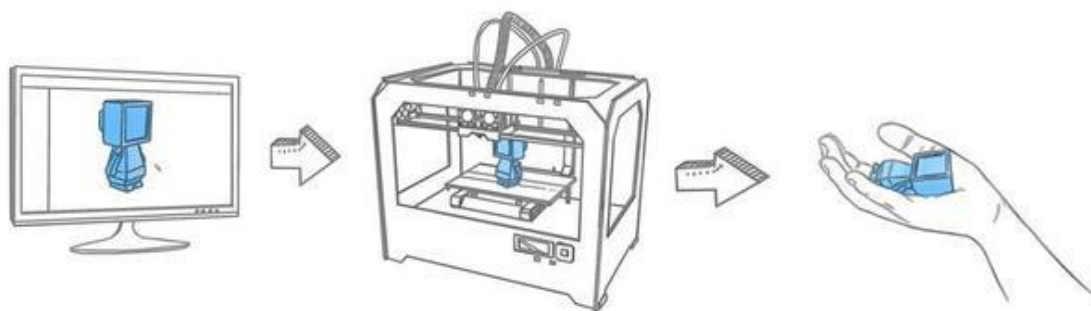
การศึกษาการออกแบบไซโคลนโดยการจำลองกระบวนการและการพิมพ์สามมิติภายในวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งการหาแบบจำลองและภาวะในการจำลองที่เหมาะสมของไซโคลนสแตมานในระบบสามมิติโดยเทียบกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9] ส่วนที่สองการออกแบบไซโคลนรูปแบบใหม่และจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณตามแบบจำลองและภาวะจากส่วนที่หนึ่ง และส่วนที่สาม การพิมพ์ไซโคลนต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองกระบวนการ

ส่วนที่หนึ่งการหาแบบจำลองและภาวะที่เหมาะสมในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 17.2 และเพื่อความแม่นยำจะเปรียบเทียบผลของความดันลด (pressure drop) ที่ความเร็วทางเข้า (inlet velocity) ต่างๆ กับงานวิจัยของ Azadi และคณะ [9] เริ่มจากสร้างโดเมนคำนวณ (computational domain) ของไซโคลนสแตมานในระบบสามมิติที่มีขนาดและรูปแบบตามงานวิจัยของ Azadi และคณะ [9] ด้วยโปรแกรม GAMBIT 2.2.30 แล้วทำ grid independent test เพื่อให้ได้ปริมาตรสำหรับการคำนวณที่เหมาะสม ทดสอบเวลาในการจำลอง (time independent test) ที่เหมาะสม และจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (solid volume fraction) ของ Cyclone I และ II

ส่วนที่สองการออกแบบไซโคลนรูปแบบใหม่โดยมีไซโคลนสแตมานเป็นมาตรฐานในการตัดแปลงรูปร่าง จะปรับโครงสร้าง 2 ส่วนหลักๆ คือ การปรับมุมของทางเข้า (angle of inlet) และการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกของแก๊ส (diameter of vortex finder) ทำการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยแบบจำลองและภาวะเดียวกับการทดลองส่วนที่หนึ่ง โดยศึกษาผลของความดันลด (Pressure drop) ประสิทธิภาพการแยก (collection efficiency) และขนาดอนุภาคตัด (cut-off diameter, d_{50}) ของไซโคลนรูปแบบต่างๆ เทียบกับไซโคลนสแตมาน

ส่วนที่สามการพิมพ์ไซโคลนต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ สร้างไซโคลนสแตมานด้วยพลาสติก ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) โดยวาดรูปไซโคลนให้มีความหนาและมีขนาดตาม Azadi และคณะ [9] จากนั้นนำไฟล์รูปที่ต้องการจะพิมพ์ไป “หั่น” ด้วยโปรแกรม FlashPrint เพื่อให้ชิ้นงานเรียงตัวซ้อนกันเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ พร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขในการพิมพ์ เช่น การสร้างตัวรองรับ (support) อุณหภูมิของหัวพิมพ์ (extruder temperature) อุณหภูมิ

แผ่นพิมพ์ (plate temperature) ความถี่ของชั้นในการพิมพ์ รวมไปถึงวัสดุที่จะนำมาใช้พิมพ์ ส่งข้อมูลทั้งหมดเข้าเครื่องพิมพ์ จนได้ชิ้นงานสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากนั้นนำชิ้นงานสามมิติที่ได้ไปทำการทดลองด้วยการวัดความดันที่อัตราการไหลขาเข้าของไซโคลนเท่ากับ 40 60 80 และ 100 ลิตรต่อนาที และเทียบผลกับการจำลองกระบวนการ (simulation)



รูปที่ 3.1 กระบวนการในการพิมพ์สามมิติ เริ่มจากการสร้างไฟล์สามมิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่งไปยังเครื่องพิมพ์ จนได้ชิ้นงานต้นแบบสามมิติ [1]

3.2 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3.2.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (pre-processor)

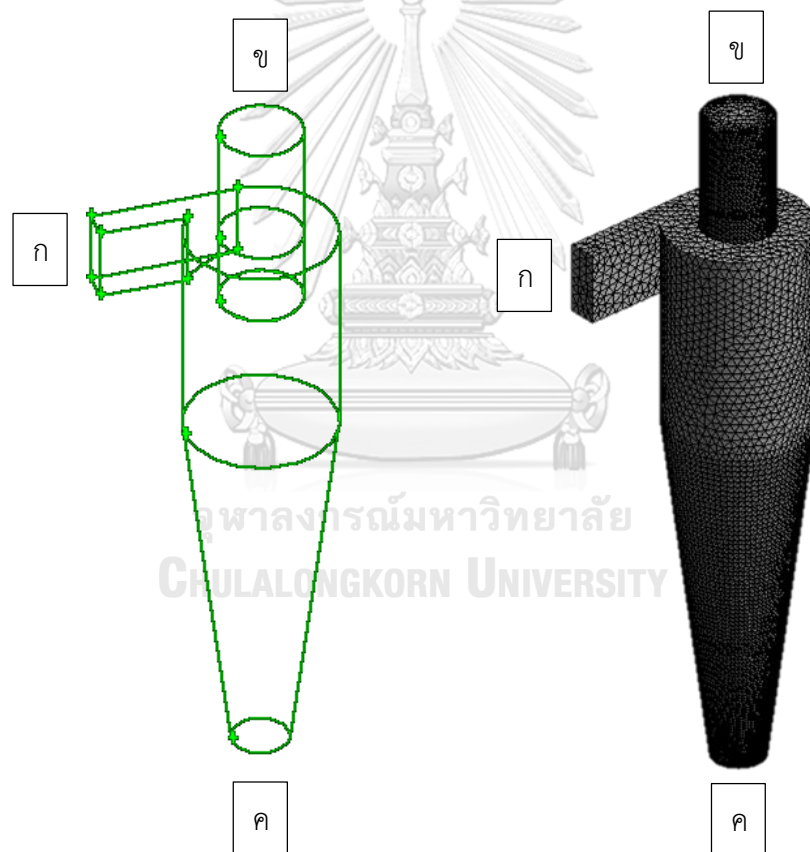
การสร้างโดเมนคำนวณของไซโคลนสแตมานในระบบสามมิติด้วยโปรแกรม GAMBIT 2.2.30 ที่มีพารามิเตอร์ของส่วนต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) ของไซโคลนสแตมาน Cyclone I และ Cyclone II [9]

	Dimensions (mm)	
	Cyclone I	Cyclone II
Cylinder diameter, D	30.5	305
Vortex finder, De	15.2	152
Inlet height, a	15.2	152
Inlet width, b	6.1	61
Outlet pipe length, he	15.2	152
Cyclone total length, H	122	1220

Cylinder height, h	45.7	457
Dust outlet diameter, B	11.4	114

เมื่อสร้างโดเมนคำนวณของไซโคลนในระบบสามมิติตามพารามิเตอร์ข้างต้นแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ซ้าย) จากนั้นทำการแบ่งโดเมนคำนวณเป็นปริมาตรควบคุม (control volume) เล็กๆ จำนวนเซลล์คำนวณ (mesh cells) ข้างต้นสำหรับงานส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 180,000 เซลล์ ตามที่รายงานไว้ในการศึกษาทดลองของ Azadi และคณะ [9] ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ขวา) กำหนดทิศทางการเข้า-ออกของแก๊สและอนุภาคของแข็งของไซโคลน โดยกำหนดทางเข้า (inlet) ของแก๊ส กำหนดทางออกของแก๊ส (vortex finder) และทางออกของอนุภาคของแข็ง (dust outlet)



รูปที่ 3.2 (ซ้าย) โดเมนคำนวณ (computational domain) (ขวา) การแบ่งโดเมนคำนวณเป็นปริมาตรควบคุม (control volume) ในระบบสามมิติ

(ก) ทางเข้า (ข) ทางออกของแก๊ส (ค) ทางออกของอนุภาคของแข็ง

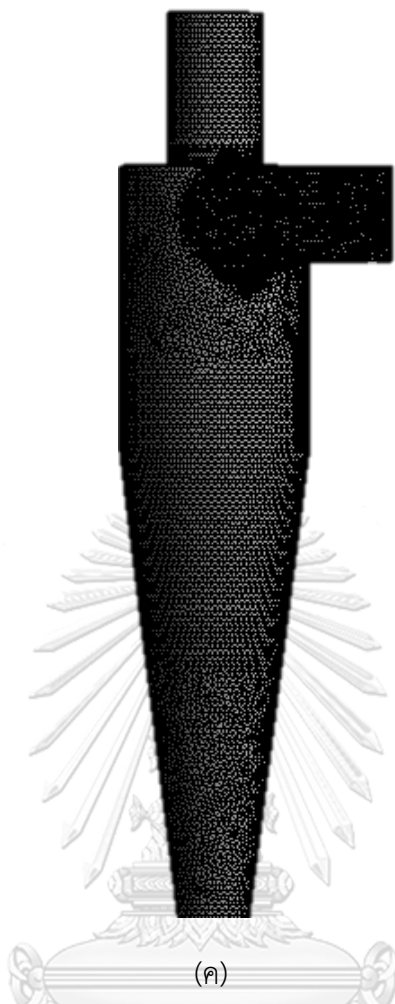
3.2.1.1 การทดสอบปริมาตรควบคุม (grid independent test)

สำหรับไซโคลนที่ออกแบบใหม่โดยการปรับจากโครงสร้างไซโคลนมาตรฐานนั้นจำเป็นต้องทดสอบปริมาตรควบคุมก่อนการจำลองกระบวนการไหล เพื่อที่จะเลือกใช้ปริมาตรควบคุมหรือจำนวนเซลล์จำนวนที่เหมาะสมเป็นการลดการใช้ทรัพยากรต่างๆ เพราะถ้าปริมาตรควบคุมสำหรับการคำนวณน้อยเกินไป ก็ส่งผลให้ค่าที่ได้ไม่แม่นยำ มีความคลาดเคลื่อนสูง ในทางตรงข้ามถ้าปริมาตรควบคุมมากเกินไป ผลที่ได้จะมีความแม่นยำมาก แต่จะใช้เวลาในการคำนวณที่นานเกินไป และการใช้ทรัพยากรอื่นๆ เกินความจำเป็น ฉะนั้น การใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยลง และยังคงให้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำถูกต้องสูงเมื่อเทียบกับผลจากการทดลองย่อมเป็นทางเลือกที่ดี โดยจำนวนเมช (mesh) ที่จะทดสอบสำหรับโดเมนคำนวณในระบบสามมิติของไซโคลนในงานวิจัยนี้จะใช้เมช 3 เมช ได้แก่ 120,000 180,000 และ 240,000 เซลล์ ดังแสดงที่รูป 3.3(ก)-3.3(ค) โดยนำปริมาตรควบคุมมาจำลองกระบวนการไหลด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 17.2 แล้วจึงเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้



(ก)

(ข)



รูปที่ 3.3 โดเมนคำนวณในระบบสามมิติของไซโคลน (ก) 120,000 เซลล์ (ข) 180,000 เซลล์ และ (ค) 240,000 เซลล์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.1.2 การทดสอบเวลาในการจำลอง (time independent test)

การหาช่วงเวลาในการจำลองการไหลที่เหมาะสม เป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะช่วยให้สามารถใช้ทรัพยากรต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการเลือกช่วงเวลาในการจำลองการไหลนั้นจะต้องเลือกช่วงที่ให้ผลการจำลองอย่างสม่ำเสมอ (steady state) และจะใช้เวลาที่เหมาะสมนี้ เป็นตัวแทนในการศึกษาต่อไป

3.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) และแก้ปัญหา

การศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการไหลในไซโคลน เป็นแบบ transient และกำหนด time step size เท่ากับ 1×10^{-3} วินาที [9]

งานส่วนที่หนึ่งต้องการหาภาวะสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อเทียบกับผลการทดลองของ Azadi และคณะ [9] แบบจำลองที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ RNG k- ϵ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่อธิบายการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence flow) มีความถูกต้องแม่นยำสำหรับรูปแบบการไหลหมุนวน (rotating flow) ของอากาศ ซึ่งเหมาะกับการศึกษาการไหลภายในไซโคลนเพราะไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่มีรูปแบบการไหลหมุนวนเนื่องจากแรงเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการแยกระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง และให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง [9, 24] จากนั้นนำแบบจำลองและภาวะการจำลองไปใช้ศึกษาไซโคลนที่ออกแบบใหม่ต่อไป โดยการหาค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งป้อนเข้าที่เหมาะสม

งานส่วนที่สองศึกษาพฤติกรรมของการไหลภายในไซโคลนในระบบสามมิติ ความดันลด และประสิทธิภาพการแยก ด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลนที่ออกแบบใหม่ โดยใช้แบบจำลองและภาวะการจำลองที่ได้จากงานในส่วนที่หนึ่ง เมื่อกำหนดภาวะขอบเขต (boundary condition) และภาวะดำเนินการ (operating condition) ดังนี้

ภาวะดำเนินการ (operating condition)

แรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) = 9.81 m/s^2 ทิศทาง z (z direction)

ความดันอ้างอิง (reference pressure) = 101,325 Pa

อุณหภูมิอ้างอิง (reference temperature) = 298.15 K

ภาวะขอบเขต (boundary condition)

ตารางที่ 3.2 ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองใน ANSYS Fluent 17.2 (ส่วนที่หนึ่ง)

	Conditions
Inlet velocity (m/s)	5,10,15,20,25
Volume fraction *	< 10%
Particle size distribution (μm)**	0.026-3.4, 1-7
Particle density (kg/m^3) ***	1050, 860
Drag coefficient	Morsi and Alexander
Air density (kg/m^3)	1.184
Viscosity ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)	1.849×10^{-5}

หมายเหตุ: * งานส่วนที่หนึ่ง หาค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง <10%

** 0.026-3.4 สำหรับ cyclone I และ 1-7 สำหรับ cyclone II

*** 1050 สำหรับ cyclone I และ 860 สำหรับ cyclone II

ตารางที่ 3.3 ภาวะขอบเขตสำหรับการจำลองใน ANSYS Fluent 17.2 (ส่วนที่สอง)

	Conditions
Inlet velocity (m/s)	15
Volume fraction*	1×10^{-6}
Particle size distribution (μm)	1.5
Particle density (kg/m^3)	1050
Drag coefficient	Morsi and Alexander
Air density (kg/m^3)	1.184
Viscosity ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)	1.849×10^{-5}

หมายเหตุ: * สำหรับไซโคลนที่มีขนาดโดเมนคำนวณเท่ากับ Cyclone I

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

การไหลที่เกิดขึ้นในไซโคลนประกอบด้วยสองวัฏภาคคือ แก๊ส (gas phase) และของแข็ง (solid phase) ซึ่งเกิดแรงที่ทำให้ทั้งสองวัฏภาคแยกออกจากกัน คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) และแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี ออยเลอร์-ออยเลอร์ (Eulerian-Eulerian method) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลของทั้งสองวัฏภาค (gas phase และ solid phase) ซึ่งควบคุมโดยสมการพื้นฐาน (governing equation)

1. สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations)

วัฏภาคแก๊ส ,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) = 0 \quad (3.1)$$

วิภูภาคของแข็ง ,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ

ϵ_g	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวิภูภาคแก๊ส (-)
ϵ_s	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวิภูภาคของแข็ง (-)
ρ_g	คือ	ความหนาแน่นของวิภูภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของวิภูภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
\mathbf{v}_g	คือ	ความเร็วของวิภูภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที)
\mathbf{v}_s	คือ	ความเร็วของวิภูภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)
t	คือ	เวลา (วินาที)

โดย ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของวิภูภาคแก๊ส (ϵ_g) และวิภูภาคของแข็ง (ϵ_s) จะมีค่ารวมกันเท่ากับ 1

2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations)

วิภูภาคแก๊ส ,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\epsilon_g \nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g + \epsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \sum_{s=1}^n \beta_{gs} (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_g) \quad (3.3)$$

วิภูภาคของแข็ง ,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = -\epsilon_s \nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \epsilon_s \rho_s \mathbf{g} + \sum_{s=1}^n \beta_{ss} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$\boldsymbol{\tau}_g$	คือ	แรงเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล)
$\boldsymbol{\tau}_s$	คือ	แรงเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล)
ρ_g	คือ	ความดันวิภูภาคแก๊ส (ปาสคาล)
ρ_s	คือ	ความดันวิภูภาคของแข็ง (ปาสคาล)

- β_{gs} คือ แบบจำลองต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
- g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3. สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่ง (fluctuation kinetic energy conservation equation)

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s u_s \theta_s) \right] = (-p_s + \tau_s) \cdot \nabla v_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \theta_s) - \gamma_s + \phi_{gs} \quad (3.5)$$

เมื่อ

- I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)
- θ_s คือ พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาค (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)
- k_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
- γ_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

4. สมการเสริม (Constitutive equation)

สมการเสริมถูกใช้งานเพื่อช่วยสำหรับการแก้สมการของตัวแปรในเทอมของสมการอนุรักษ์ข้างต้น ซึ่งความเค้นเทนเซอร์ของทั้งสองวัฏภาคถูกนำมาแก้ด้วยสมการสามารถแสดงได้ดังนี้

วัฏภาคแก๊ส ,

$$\tau_g = \epsilon_g \mu_g \left[\frac{1}{2} \left[\nabla \cdot v_g + (\nabla \cdot v_g)^T \right] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v_g) I \right] \quad (3.6)$$

วัฏภาคของแข็ง ,

$$\tau_s = \epsilon_s \mu_s \left[\nabla \cdot v_s + (\nabla \cdot v_s)^T \right] - \epsilon_s \left(\xi - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot v_s \quad (3.7)$$

เมื่อ

ξ คือ ความหนืดรวม (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

สมการความดันของอนุภาค (solid pressure) นั้นจะประกอบไปด้วย 2 พจน์ คือ สมการจลนศาสตร์และสมการเนื่องจากการชนกันของอนุภาค ซึ่งค่าของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง (solid volume fraction) นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดในการอัดตัว (maximum packing) โดยจะคำนวณออกมาในพจน์ของ gradient จากสมการโมเมนตัม

$$P_s = \epsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1+e) \epsilon_s^2 g_0 \theta_s \quad (3.8)$$

เมื่อ

g_0 คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมีของอนุภาคของแข็ง (-)

ϵ_s คือ ค่า restitution coefficient ระหว่างอนุภาคของแข็ง (-)

ความหนืดที่เกิดภายในประกอบด้วยความหนืดจากการชน ($\mu_{s,col}$) ความหนืดจากจลนศาสตร์ ($\mu_{s,kin}$) และความหนืดรวม (ξ_s) เนื่องจากการต้านทานการอัด (compression) และการขยายตัว (expansion) ของอนุภาคของแข็ง คำนวณได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \epsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (3.9)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10\rho_s d_p \sqrt{\theta\pi}}{96\epsilon_s (1+e)g_0} \left[1 + \frac{4}{5} g_0 \epsilon_s (1+e) \right]^2 \quad (3.10)$$

$$\xi_s = \frac{4}{3} \epsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.11)$$

ฟังก์ชันการกระจายตัวตามแนวรัศมี (radial distribution function) เป็นความน่าจะเป็นของการชนกันระหว่างอนุภาคของแข็ง เมื่อสัดส่วนของอนุภาคของแข็งในการอัดตัวนั้นจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.6

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{s,\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.12)$$

เมื่อ

$\epsilon_{s,\max}$ คือ การอัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นที่สุดของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (-)

พลังงานจลน์ของการกวัดแกว่งเนื่องมาจากการนำถูกกำหนดโดยค่าพลังงานการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดเล็ก

$$K_s = \frac{150\rho_s d_s \sqrt{\theta_s} \pi}{384(1+e)g_0} \left[1 + \frac{6}{5} \epsilon_s g_0 (1+e) \right]^2 + 2\rho_s \epsilon_s^2 d_p (1+e) g_0 \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.13)$$

อัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์ของการกวัดแกว่งที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคของแข็งที่ไม่ยืดหยุ่น แสดงดังสมการนี้

$$\gamma_s = 3\epsilon_s^2 \rho_s g_0 \theta (1-e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\theta}{\pi} \right) \right] \quad (3.14)$$

5. แบบจำลองสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Interphase exchange coefficient model, β_{gs})

แบบจำลองสัมประสิทธิ์ต้านทานเป็นแบบจำลองทางฟิสิกส์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในของไหล

แบบจำลอง Gidaspow

แบบจำลอง Gidaspow เหมาะกับระบบที่มีช่วงของอนุภาคหนาแน่น (dense zone) และช่วงบางเบา (dilute zone) โดยเป็นแบบจำลองที่ได้จากการรวมกันของสมการ Ergun และ Wen-Yu

$$\beta_{gs} = \begin{cases} \frac{150 \epsilon_s (1-\epsilon_s) \mu_g}{\epsilon_s d_p^2} + \frac{\epsilon_s \rho_g |v_g - v_s|}{d_p}, & \epsilon_s \leq 0.80 \\ \frac{3}{4} C_{D0} \rho_g \frac{(1-\epsilon_s) \epsilon_s}{d_p} |v_g - v_s| C_{D0} \epsilon_s^{-2.65}, & \epsilon_s > 0.80 \end{cases} \quad (3.15)$$

และ

$$\text{Re} < 1000; C_{D0} = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687} \right); \text{Re} = \frac{\epsilon_g \rho_g d_p |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s|}{\mu_g} \quad (3.16)$$

$$\text{Re} \geq 1000; C_{D0} = 0.44 \quad (3.17)$$

6. แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent models)

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเป็นรูปแบบการไหลโดยทั่วไปของของไหล ระบบสมการการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow equations) สามารถคำนวณเพื่อแก้ปัญหาของรูปแบบการไหลได้ในหลายๆ รูปแบบ โดยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent models) ที่สำคัญสามารถจัดกลุ่มได้ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 กลุ่มของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent models)

Based on (time averaged)	Zero equation model- mixing length model
Reynolds equations	Two-equation model- k- ϵ model
	Reynolds stress equation model
	Algebraic stress model
Based on space-filtered equations	Large eddy simulation

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลอง Reynolds stress model (RSM)

แบบจำลอง Reynolds stress model ใช้จำลองรูปแบบของการไหลที่มีความปั่นป่วนสูง เช่น การไหลที่เกิดจากการหมุน การไหลที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสามารถแก้สมการการเคลื่อนที่ (transport equations) พร้อมกับสมการอัตราการแพร่กระจาย (dissipation rate) ของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ปั่นป่วน (turbulent kinetic energy, ϵ) โดยจะแก้สมการเพิ่ม 7 สมการสำหรับการจำลองในระบบสามมิติ ซึ่งจะสามารถทำนายรูปแบบการไหลที่มีความซับซ้อนและการไหลในลักษณะหมุนวนได้ และให้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำสูง โดยรูปแบบสมการ Reynolds stress model แสดงดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial \chi_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3.18)$$

เมื่อ

D_{ij} คือ การแพร่ปั่นป่วน

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial \chi_k} \left[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} - \mu \left(\frac{\partial}{\partial \chi_k} \overline{u'_i u'_j} \right) \right] \quad (3.19)$$

P_{ij} คือ ผลคูณความเค้นความดัน

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial \chi_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial \chi_k} \right] \quad (3.20)$$

Π_{ij} คือ ความเครียด

$$\Pi_{ij} = \rho' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial \chi_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial \chi_i} \right) \quad (3.21)$$

ε_{ij} คือ การแพร่กระจาย

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial \chi_k} \frac{\partial u'_j}{\partial \chi_k} \quad (3.22)$$

แบบจำลอง RNG k-ε

แบบจำลอง RNG k-ε เป็นสมการการเคลื่อนที่ (transport equations) สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน (turbulent kinetic energy, k) และอัตราการแพร่กระจาย (dissipation rate, ε) ซึ่งเปลี่ยนรูปจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial \chi_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.23)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \chi_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (3.24)$$

เมื่อ

$$\text{ค่าคงที่ } C_{1\varepsilon} = 1.42 \text{ และ } C_{2\varepsilon} = 1.68$$

ตามข้อสมมติฐานของสมการมาตรฐาน (governing equations) สำหรับสมการการเคลื่อนที่ (transport equations) ของ RSM สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \chi_k} \left(\rho u_k \overline{u'_j u'_j} \right) = & - \frac{\partial}{\partial \chi_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial \chi_k} \right) - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial \chi_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial \chi_k} \right) \\ & + \rho \left(\frac{\partial u'_i}{\partial \chi_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial \chi_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial \chi_k} \frac{\partial u'_j}{\partial \chi_k} \end{aligned} \quad (3.25)$$

เมื่อ

μ_t คือ ค่าความหนืด eddy คำนวณได้จากสมการ (3.26)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.26)$$

เมื่อ

$$C_\mu = 0.09$$

ตารางที่ 3.5 การออกแบบการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของ Cyclone I และ Cyclone II เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม

รูปแบบไซโคลน	ความเร็วป้อนเข้า (เมตร/วินาที)	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร) *	สัดส่วนโดยปริมาตรของ ของแข็ง (-)
Cyclone I	5	1.5 (3)	0.1
		1.5 (3)	0.01
		1.5 (3)	0.001

Cyclone II		1.5 (3)	0.0001 **
		1.5 (3)	0.00001
		1.5 (3)	0.000001 ***
Cyclone I Cyclone II	10	1.5 (3)	0.1
		1.5 (3)	0.01
		1.5 (3)	0.001 **
		1.5 (3)	0.0001
		1.5 (3)	0.00001
		1.5 (3)	0.000001 ***
Cyclone I Cyclone II	15	1.5 (3)	0.1
		1.5 (3)	0.01
		1.5 (3)	0.001
		1.5 (3)	0.0001 **
		1.5 (3)	0.00001
		1.5 (3)	0.000001 ***
Cyclone I Cyclone II	20	1.5 (3)	0.1
		1.5 (3)	0.01
		1.5 (3)	0.001
		1.5 (3)	0.0001 **
		1.5 (3)	0.00001
		1.5 (3)	0.000001 ***
		1.5 (3)	0.1
		1.5 (3)	0.01

Cyclone I	25	1.5 (3)	0.001
Cyclone II	25	1.5 (3)	0.0001 **
		1.5 (3)	0.00001
		1.5 (3)	0.000001 ***

หมายเหตุ: * ค่าในเครื่องหมาย (-) เป็นขนาดอนุภาคสำหรับ Cyclone II

** ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ผลมีแนวโน้มเข้าใกล้ Cyclone II

*** ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ผลมีแนวโน้มเข้าใกล้ Cyclone I

ตารางที่ 3.6 การออกแบบการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของ Cyclone I และ Cyclone II เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม (ต่อ)

รูปแบบไซโคลน	ความเร็วป้อนเข้า (เมตร/วินาที)	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	สัดส่วนโดยปริมาตรของ ของแข็ง (-)
Cyclone I	5	1.5	0.000002
		1.5	0.000003
		1.5	0.000004
		1.5	0.000005
		1.5	0.000006
		1.5	0.000007
Cyclone I	10	1.5	0.000002
		1.5	0.000003
		1.5	0.000004
		1.5	0.000005
		1.5	0.000006
		1.5	0.000007

Cyclone I	15	1.5	0.000002
		1.5	0.000003
		1.5	0.000004
		1.5	0.000005
		1.5	0.000006
		1.5	0.000007
Cyclone I	20	1.5	0.000002
		1.5	0.000003
		1.5	0.000004
		1.5	0.000005
		1.5	0.000006
		1.5	0.000007
Cyclone I	25	1.5	0.000002
		1.5	0.000003
		1.5	0.000004
		1.5	0.000005
		1.5	0.000006
		1.5	0.000007

หมายเหตุ: สำหรับ Cyclone II ใช้ขนาดอนุภาค เท่ากับ 3 ไมโครเมตร และสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เท่ากับ (0.0002 0.0003 0.0004 0.0005 0.0006 และ 0.0007) ตามลำดับ ที่ความเร็วเดียวกันกับ Cyclone I

3.2.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ

การแสดงผลจากผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics) นั้น มักประกอบด้วยความดันและอุณหภูมิ รวมถึงความเร็วในทิศทางต่างๆ ที่ตำแหน่งต่างๆ ในโดเมนคำนวณ (computational domain) ที่สร้างขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจลักษณะทางกายภาพของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการคำนวณโดยเฉพาะในระบบสามมิติ โดยผลลัพธ์ต่างๆ นั้นสามารถแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟ เวกเตอร์ หรือรูปแบบคอนทัวร์ บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ และทำการเปรียบเทียบผลกับการทดลองต่างๆ เพื่อความแม่นยำ และถูกต้อง ก่อนนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ และสรุปผลสำหรับการวิจัย



3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องพิมพ์สามมิติ ยี่ห้อ Flashforge รุ่น Creator Pro/ Dual แสดงดังรูปที่ 3.4
- 2) เซ็นเซอร์วัดความดัน (pressure probe) รุ่น PS-3200 ยี่ห้อ AirLink
- 3) เครื่องอัดอากาศ (air compressor)
- 4) เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ (air flow meter) รุ่น K-5011 ช่วงการไหล 40-400 NL/min ยี่ห้อ Nitto



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 เครื่องพิมพ์สามมิติ ยี่ห้อ Flashforge รุ่น Creator Pro/ Dual

3.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นก่อนการใช้งานเครื่องพิมพ์สามมิติ

PLA (polylactic acid)

- อุณหภูมิหัวฉีด 190-230 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิแท่นพิมพ์ (ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนที่แท่นพิมพ์)
- ความเร็วขณะฉีด (extruding speed) 50-80 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วขณะไม่ได้ฉีด (traveling speed) 60-80 มิลลิเมตรต่อวินาที

ABS (acrylonitrile butadiene styrene)

- อุณหภูมิหัวฉีด 215-240 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิแท่นพิมพ์ 90-110 องศาเซลเซียส
- ความเร็วขณะฉีด (extruding speed) 40-60 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วขณะไม่ได้ฉีด (traveling speed) 60-80 มิลลิเมตรต่อวินาที

เนื่องจากเครื่องพิมพ์สามมิติ รุ่น Flashforge Creator Pro/ Dual เป็นเครื่องพิมพ์แบบ 2 หัวฉีด จึงต้องทำความเข้าใจถึงตำแหน่งของหัวฉีดเพื่อไม่สับสนขณะกำหนดสถานะของการพิมพ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MakerWare หรือ FlashPrint โดยให้ยึดหลักการหันหน้าเข้าเครื่องพิมพ์

- ด้านขวาของมือ คือ หัวฉีดขวา
- ด้านซ้ายของมือ คือ หัวฉีดซ้าย

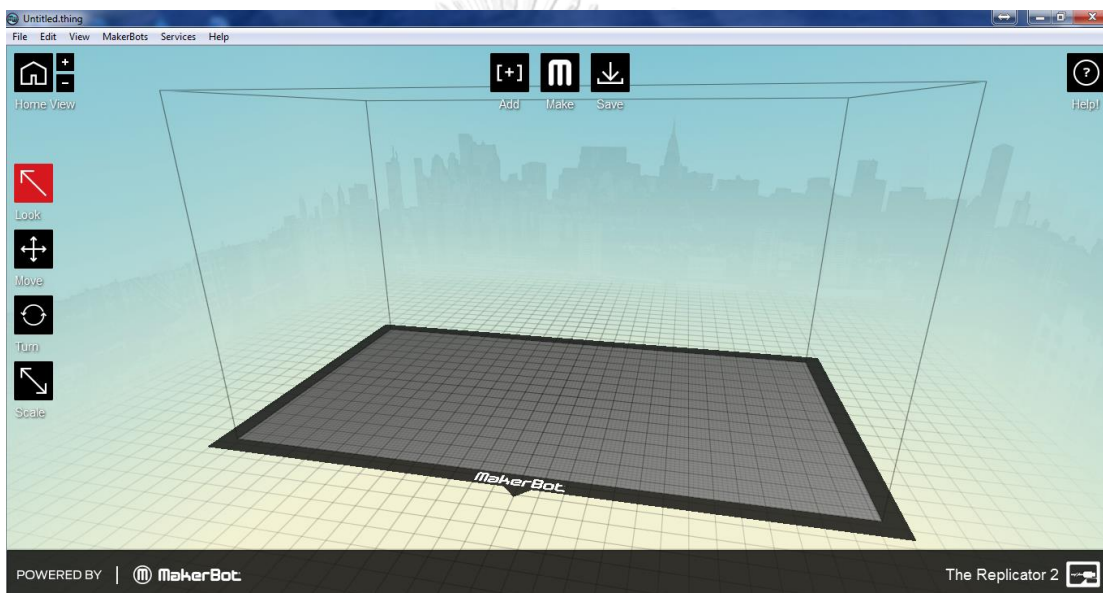
คำศัพท์ที่ควรรู้สำหรับเครื่องพิมพ์และการพิมพ์สามมิติ

- Extruder คือ หัวฉีด
- Heated bed/Build plate คือ แท่นพิมพ์
- Filament คือ เส้นพลาสติกที่เป็นวัสดุในการพิมพ์
- Raft คือ การสร้างแพที่ฐานของชิ้นงาน เพื่อช่วยให้ชิ้นงานยึดติดกับแท่นพิมพ์ได้ดีขึ้น
- Overhang คือ จุดที่ชิ้นงานห้อยตัวไม่มีส่วนที่รองรับ หรือ Support
- Support คือ ส่วนที่โปรแกรมสำเร็จรูปสร้างขึ้น เพื่อรองรับบริเวณที่ชิ้นงานห้อยตัว (overhang)
- Blue tape คือ เทปของ 3M เป็นสีฟ้า นิยมใช้กับเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งช่วยทำให้ชิ้นงานยึดติดกับแท่นพิมพ์ได้ดีขึ้น และช่วยรักษาแท่นพิมพ์ไม่ให้หัวฉีดสัมผัสกับแท่นพิมพ์โดยตรง

3.3.2 ขั้นตอนสำหรับการพิมพ์สามมิติ

สำหรับการพิมพ์สามมิติจำเป็นต้องสร้างไฟล์ของชิ้นงานก่อนโดยวิธีการหลักๆ มีสองวิธี คือ การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับสร้างรูปที่สนใจ และการใช้เครื่องสแกนสำหรับสแกนชิ้นงานสามมิติ โดยจะต้องให้ไฟล์อยู่ในนามสกุล .stl หรือ .obj เพื่อนำไฟล์ต่าง ๆ นั้นเข้าโปรแกรม (MakerWare หรือ FlashPrint) เพื่อทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชั้นๆ (layer) การกำหนดภาวะต่างๆ สำหรับการขึ้นรูปสามมิติในเครื่องพิมพ์

- เริ่มจากการสร้างไฟล์สำหรับพิมพ์สามมิติด้วยโปรแกรม MakerWare แสดงดังรูปที่ 3.5



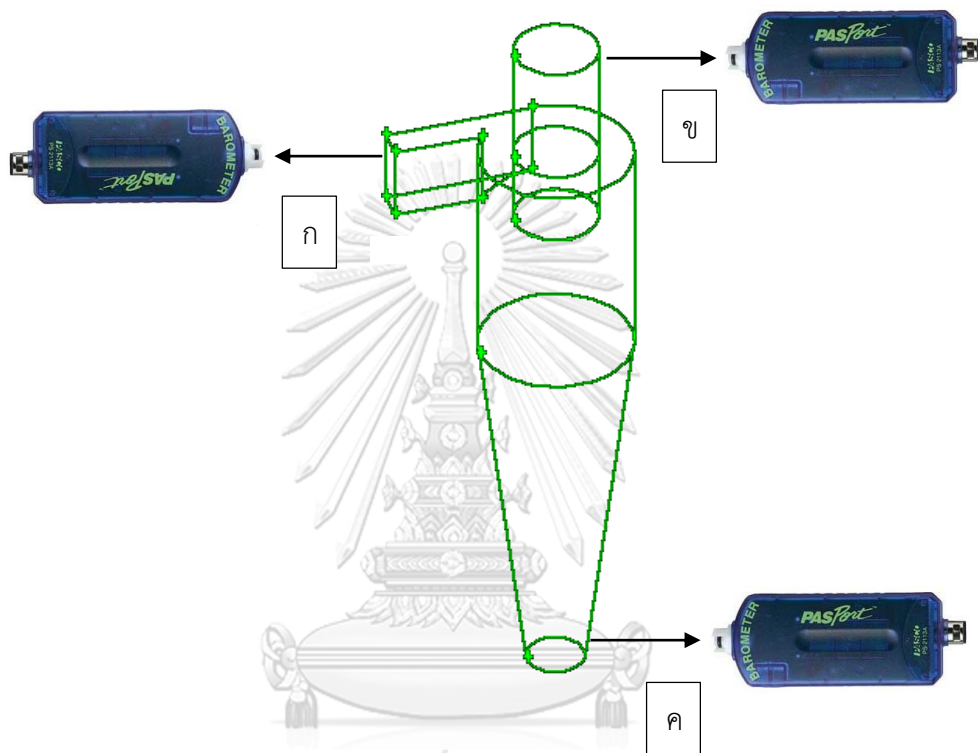
รูปที่ 3.5 หน้าจอโปรแกรม MakerWare สำหรับสร้างไฟล์ชิ้นงานเป็นสามมิติ เพื่อส่งเข้าเครื่องพิมพ์

- 1) โหลดไฟล์เข้าโปรแกรมโดยคลิก Add เลือกไฟล์นามสกุล .stl หรือ .obj
- 2) กดปุ่ม Make (สัญลักษณ์ M) สำหรับกำหนดภาวะต่างๆ สำหรับการพิมพ์ (ต้องเลือกรุ่นของเครื่องพิมพ์ที่ใช้ที่ช่อง Export for ให้เป็น Flashforge Creator Pro/ Dual)
- 3) เลือกชนิดของพลาสติกที่ใช้พิมพ์ (ต้องกำหนดพลาสติกที่ใส่ในหัวฉีดให้ตรงกับค่าที่กำหนดในโปรแกรม)
- 4) กำหนดความละเอียดของชิ้นงานที่บริเวณ Resolution (ความละเอียดมีสาม ระดับ 1. Low ความละเอียดต่ำ 2. Standard ความละเอียดมาตรฐาน 3. High ความละเอียดสูง)
- 5) Raft ต้องการสร้างแพเพื่อให้ชิ้นงานติดกับแท่นพิมพ์ได้ดีขึ้นหรือไม่

- Off คือ ไม่สร้างแพสำหรับพิมพ์
 - Color matched คือ พิมพ์แพสีเดียวกับชิ้นงาน
 - Left extruder คือ กำหนดให้พิมพ์จากหัวฉีดทางซ้ายเท่านั้น
 - Right extruder คือ กำหนดให้พิมพ์จากหัวฉีดทางขวาเท่านั้น
- 6) Support การสร้างตัวรองรับหรือหมอนรองสำหรับชิ้นงานที่ยื่นออกมาในอากาศ
- Off คือ ไม่สร้าง support
 - Color matched คือ พิมพ์ตัวรองรับสีเดียวกับชิ้นงาน
 - Left extruder คือ กำหนดให้พิมพ์จากหัวฉีดทางซ้ายเท่านั้น
 - Right extruder คือ กำหนดให้พิมพ์จากหัวฉีดทางขวาเท่านั้น
- 7) สำหรับ Advanced options ส่วนนี้จะต้องกำหนดคุณภาพของการพิมพ์ (quality) อุณหภูมิของการพิมพ์ (temperature) และความเร็วในการพิมพ์ (speed)
- Quality
 - Infill คือ ปริมาณของเนื้อพลาสติกที่พิมพ์ภายในโครงสร้างชิ้นงาน ตั้งได้ตั้งแต่ 0-100 (0 ภายในกลวง และ100 ภายในตัน)
 - Number of shells คือ จำนวนรอบของการพิมพ์ที่ผนังของชิ้นงาน
 - Layer height คือ ความสูงในแต่ละชั้น ซึ่งจะส่งผลต่อความละเอียดของชิ้นงาน
 - Temperature
 - ตั้งอุณหภูมิของหัวฉีดตามคุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้พิมพ์ ตามข้อมูลที่แสดงในหัวข้อ 3.3.1
 - Speed
 - ตั้งความเร็วขณะพิมพ์ และในขณะที่ไม่ได้พิมพ์ ตามข้อมูลที่แสดงในหัวข้อ 3.3.1
- 8) เลือก preview before printing เพื่อแสดงภาพจำลองที่ผ่านการหั่นเป็นชั้นๆ ก่อนการบันทึกไฟล์เพื่อนำไปพิมพ์ในเครื่องพิมพ์สามมิติ
- 9) Save บันทึกไฟล์โดยใช้ SD-card ซึ่งมีเสถียรภาพสูงสุดสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ

3.3.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ไฮโคลนที่มีขนาดและมิติตาม Cyclone I (ตารางที่ 3.1) ที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันที่บริเวณต่างๆ ดังแสดงที่รูป 3.6 โดยเซ็นเซอร์วัดความดันทุกตำแหน่งต้องต่อกับอุปกรณ์รับสัญญาณบลูทูธ ดังแสดงที่รูป 3.7(ก) สำหรับส่งค่าของความดันมาที่แอปพลิเคชัน sparkvue ดังแสดงที่รูป 3.7(ข) เพื่อแสดงผล



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดัน (ก) ทางเข้าของไฮโคลน (ข) บริเวณทางออกของแก๊ส และ (ค) บริเวณทางออกด้านล่าง



รูปที่ 3.7 (ก) อุปกรณ์รับสัญญาณบลูทูธสำหรับเซ็นเซอร์วัดความดัน (ข) แอปพลิเคชันสำหรับอ่านค่าความดัน

3.3.4 ขั้นตอนการทดลองในห้องปฏิบัติการ

- 1) นำไซโคลนต้นแบบจากการพิมพ์สามมิติมาติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันตามตำแหน่งที่แสดงดังรูปที่ 3.6 พร้อมทั้งต่ออุปกรณ์รับสัญญาณบลูทูธ ดังรูปที่ 3.7(ก) เข้ากับเซ็นเซอร์วัดความดันที่ทุกตำแหน่ง
- 2) ติดตั้งท่อทางเดินอากาศสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดอากาศ (air compressor) ดังแสดงที่รูป 3.8 ป้อนอากาศเข้าไซโคลนที่บริเวณทางเข้า โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (air flow meter) ดังแสดงที่รูป 3.9 ควบคุมอัตราการไหลเข้าไซโคลนในหน่วย ลิตรต่อนาที (L/min)



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดอากาศ (air compressor)

ชพ เสงี่ยมเทศ วิศวกร



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ (air flow meter)

3) เปิดแอปพลิเคชัน sparkvue แสดงดังรูปที่ 3.7(ข) เพื่อเชื่อมสัญญาณบลูทูธเข้ากับเซ็นเซอร์วัดความดัน การแสดงผลของความดันจะแสดงให้เห็นในอุปกรณ์ที่ได้เชื่อมสัญญาณไว้ เช่น สมาร์ทโฟน โน้ตบุ๊ก เป็นต้น ในรูปแบบกราฟและ/หรือ ค่าเป็นตัวเลข

4) ตรวจสอบการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง รอยต่อชิ้นงานเพื่อไม่ให้เกิดรอยรั่วหรือการแตกหักก่อนทำการทดลอง รูปที่ 3.10 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำการทดลอง

5) เปิดใช้งานเครื่องอัดอากาศ (air compressor) และเปิดใช้งานเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (air flow meter) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ต่อเข้ากับไซโคลนด้วยความเร็วต่างๆ ที่ต้องการศึกษา รอจนอัตราการไหลของอากาศนิ่งจึงเริ่มกดปุ่มสำหรับเก็บค่าความดันจากสมาร์ทโฟน หรือโน้ตบุ๊กที่ได้เชื่อมสัญญาณบลูทูธไว้ บันทึกค่าความดันและส่งผ่านไปยังโปรแกรม excel เพื่อจัดการข้อมูลและคำนวณค่าความดันลด (pressure drop)

6) เปรียบเทียบค่าความดันลดจากการจำลองกระบวนการ (simulation) ด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 17.2 กับค่าความดันลดจากการทดลองด้วยไซโคลนต้นแบบที่พิมพ์สามมิติ โดยไซโคลนที่ทำการทดลองคือ ไซโคลนมาตรฐานสแตมาน (Cyclone I) และไซโคลนที่มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่สูงกว่าไซโคลนมาตรฐาน



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำการทดลอง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ผลการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งเพื่อหาโมเดลและภาวะที่เหมาะสมสำหรับไซโคลนสแตมาน (Stairmand cyclone) ในระบบสามมิติสำหรับการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) โดยเทียบกับผลของความดันลด (pressure drop) จากการทดลองของ Azadi และคณะ [9] ส่วนที่สองศึกษาผลของไซโคลนรูปแบบต่างๆ โดยใช้โมเดลและภาวะเดียวกับที่ศึกษาจากส่วนที่หนึ่ง ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และส่วนที่สาม การสร้างไซโคลนต้นแบบด้วยการพิมพ์สามมิติ ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบผลของความดันลดของไซโคลนต้นแบบกับผลจากการจำลองกระบวนการ (simulation) ของไซโคลนสแตมานในส่วนที่หนึ่ง

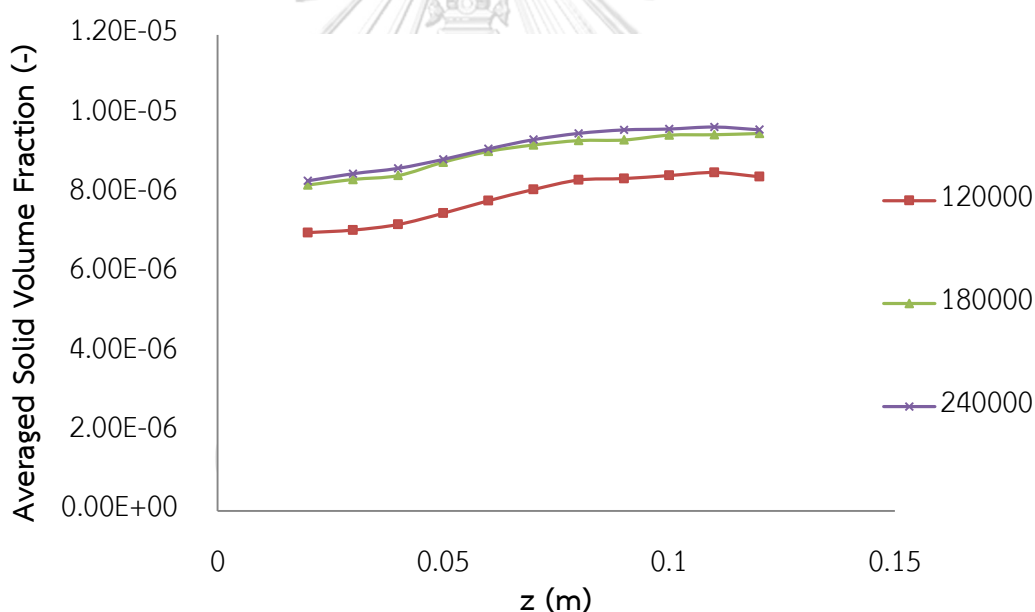
4.1 การศึกษาโมเดลและภาวะสำหรับการจำลองกระบวนการ

งานวิจัยส่วนที่หนึ่งการหาโมเดลและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 17.2 ของไซโคลนสแตมานในระบบสามมิติ ด้วยการเทียบกับผลของความดันลด (pressure drop) จากการทดลองของ Azadi และคณะ [9] โดยเริ่มจากการทดสอบปริมาตรควบคุม และเวลาที่ภาวะเสมือนคงตัวเพื่อให้ได้ปริมาตรควบคุมและเวลาที่เหมาะสมในการจำลองกระบวนการ จากนั้น ศึกษาผลของความดันลดที่ความเร็วทางเข้าต่างๆ ร่วมกับการปรับสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในระบบและเปรียบเทียบผลจากการทดลอง เมื่อได้โมเดลและภาวะที่เหมาะสมกับการจำลองแล้วจะนำไปศึกษากับไซโคลนในรูปแบบอื่นๆ ต่อไป

4.1.1 การทดสอบปริมาตรสำหรับการคำนวณ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง (grid and time independent test)

ก่อนการจำลองกระบวนการเพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำ และใช้เวลาที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ ด้วยการทดสอบจำนวนพื้นที่การคำนวณ (mesh) สำหรับโดเมนของไซโคลนในระบบสามมิติ โดยโดเมนการคำนวณสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขนาด คือ 120,000 180,000 และ 240,000 เซลล์ ตามลำดับ จากนั้น พิจารณาผลการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่า เมื่อเทียบค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเฉลี่ย (average solid volume fraction) ใน

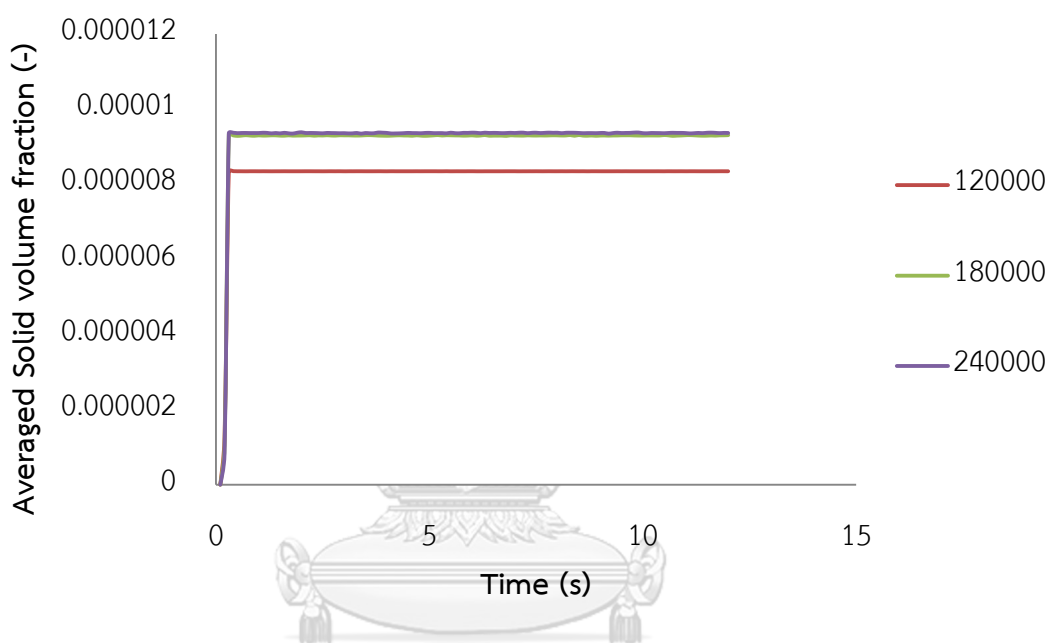
ระบบที่ระดับความสูงต่างๆ ของไซโคลนสแตมานของพื้นที่การคำนวณทั้ง 3 ขนาด ดังแสดงที่รูป 4.1 เพื่อหาจำนวนพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมสำหรับการจำลองกระบวนการ จากรูปพบว่าสำหรับพื้นที่การคำนวณทั้ง 3 ขนาด มีการกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่คล้ายคลึงกันที่ความสูงเพิ่มขึ้นปริมาตรของของแข็งจะเพิ่มขึ้น โดยผลของพื้นที่การคำนวณที่ 120,000 เซลล์ มีสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยเริ่มต้นที่ประมาณ 0.000007 และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความสูงของไซโคลน เมื่อเพิ่มพื้นที่การคำนวณเป็น 180,000 เซลล์ พบว่า ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเพิ่มขึ้นที่ทุกตำแหน่งของไซโคลน เพื่อความแม่นยำจึงเพิ่มพื้นที่การคำนวณเพิ่มเป็น 240,000 เซลล์ เพื่อตรวจสอบว่าจะส่งผลต่อสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งหรือไม่ พบว่า ที่ 240,000 เซลล์ให้ผลสอดคล้องกับพื้นที่การคำนวณที่ 180,000 เซลล์ จึงเป็นผลให้งานวิจัยนี้เลือกใช้พื้นที่การคำนวณที่ 180,000 เซลล์ เนื่องจากมีความละเอียดเพียงพอสำหรับการจำลองกระบวนการ ช่วยลดการใช้ทรัพยากรในการคำนวณ รวมถึงให้ผลการคำนวณที่ยังคงแม่นยำ และนำมาใช้กับไซโคลนในรูปร่างต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 4.1 ผลการกระจายตัวโดยเฉลี่ยของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งต่อความสูงของไซโคลนสแตมานที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ

การทดสอบเวลาที่เหมาะสมสำหรับการจำลองกระบวนการของไซโคลนในระบบสามมิติ ก่อนการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จำเป็นต้องทดสอบเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมก่อนโดยจะสังเกตจากเวลาที่ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเข้าสู่ภาวะคงตัว ซึ่งจากรูปที่ 4.2 ยังสามารถยืนยันผลของการหาพื้นที่สำหรับการคำนวณได้อีกทางหนึ่ง สำหรับพื้นที่การคำนวณที่

120,000 เซลล์ ให้สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยที่ต่ำ และเข้าสู่ภาวะคงตัวที่เวลา 0.3 วินาที เมื่อเพิ่มพื้นที่การคำนวณเป็น 180,000 และ 240,000 เซลล์ พบว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นแต่อยู่ในระดับเดียวกัน และเข้าสู่ภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.3 วินาทีเช่นกัน ดังนั้น เพื่อให้เวลาสำหรับการจำลองมีความเหมาะสม และการประเมินผลของไซโคลนมีความแม่นยำมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เวลา 10 วินาที โดยประเมินผลการจำลองจากค่าเฉลี่ยที่เวลาต่างๆ ในภาวะคงตัว



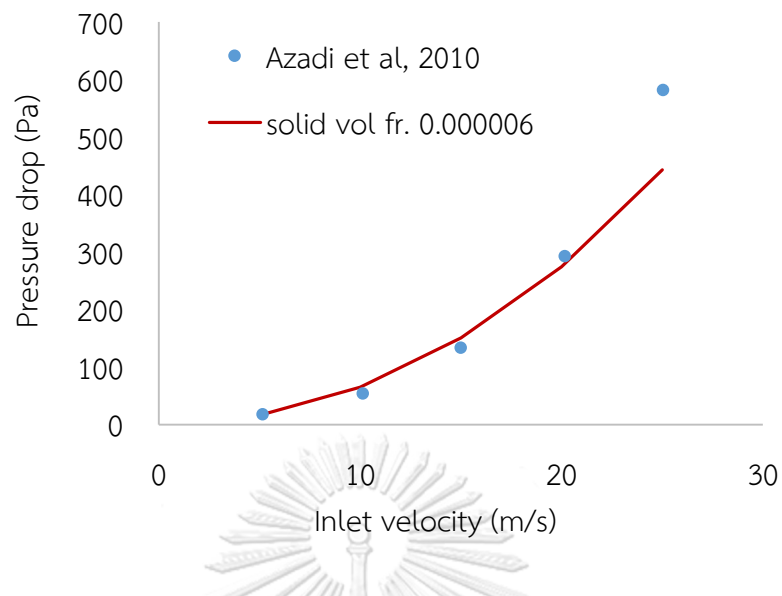
รูปที่ 4.2 ผลของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเวลาของไซโคลนสแตมมานที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ

4.1.2 การหาโมเดลและภาวะสำหรับจำลองกระบวนการโดยเทียบกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9] (Experimental Validation)

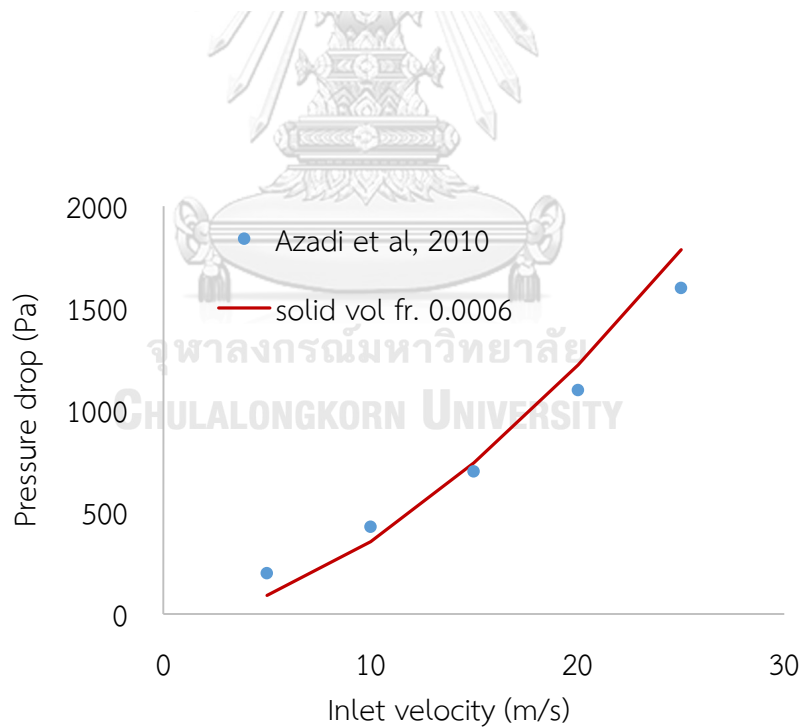
เมื่อได้ศึกษาพื้นที่การคำนวณ และเวลาที่ใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแล้ว คือ พื้นที่การคำนวณ (mesh) 180,000 เซลล์ ที่เวลา 10 วินาที จากนั้น จะศึกษาเพื่อหาโมเดลและภาวะสำหรับการจำลองกระบวนการโดยเทียบกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9] โดยจะจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเปรียบเทียบผลของความดันลด (pressure drop) ที่ความเร็วของทางเข้าเท่ากับ 5 10 15 20 และ 25 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ของไซโคลนสแตมมาน 2 ขนาด คือ ไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) และ ไซโคลนขนาดใหญ่ (cyclone II) มีขนาดและมิติ ดัง

แสดงที่ตาราง 3.1 โดยปรับค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (solid volume fraction) เพื่อให้ความดันลดที่ความเร็วขาเข้าต่างๆ ของไซโคลนมีค่าสอดคล้องกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9] จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของความดันลดที่ความเร็วของทางเข้าต่างๆ ของไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) โดยการสมมติค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง พบว่า ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่เหมาะสมเท่ากับ 0.000006 ที่ทำให้ความเร็วของทางเข้า 5 10 15 20 และ 25 เมตรต่อวินาที ของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) มีค่าความดันลดเท่ากับ 15.98 64.79 150.99 274.22 และ 442.92 ปาสคัล ตามลำดับ และสำหรับความดันลดจากการทดลองของ Azadi และคณะ [9] ที่ความเร็วทางเข้าเดียวกัน มีค่าความดันลดเท่ากับ 18.05 54.15 133.57 292.42 และ 581.22 ปาสคัล ตามลำดับ จากผลข้างต้นพบว่าความดันลดสูงขึ้นเนื่องจากความเร็วทางเข้าของไซโคลนมากขึ้น [9, 25] จะเห็นว่าที่ทุกความเร็วทางเข้าของไซโคลนมีค่าความดันลดจากการจำลองและการทดลองใกล้เคียงกัน โดยกราฟมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ยกเว้น ที่ความเร็วทางเข้าเท่ากับ 25 เมตรต่อวินาที มีค่าความดันลดต่างกันอยู่ 138.3 ปาสคัล มีค่าความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 23.79 เปอร์เซ็นต์

สำหรับไซโคลนขนาดใหญ่ (cyclone II) ทำการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อตรวจสอบอีกครั้งว่าโมเดล และภาวะต่างๆ มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการทดลองหรือไม่ จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของความดันลดที่ความเร็วของทางเข้าต่างๆ ของไซโคลนขนาดใหญ่ (cyclone II) โดยการสมมติค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง พบว่าค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่เหมาะสมเท่ากับ 0.0006 ที่ทำให้ความเร็วของทางเข้า 5 10 15 20 และ 25 เมตรต่อวินาที ของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลนขนาดใหญ่ (cyclone II) มีค่าความดันลดเท่ากับ 92.28 355.46 740.60 1221.37 และ 1786.85 ปาสคัล ตามลำดับ และสำหรับความดันลดจากการทดลองของ Azadi และคณะ ที่ความเร็วทางเข้าเดียวกัน มีค่าความดันลดเท่ากับ 199.28 427.54 699.28 1097.83 และ 1597.83 ปาสคัล ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มความดันลดจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและ การทดลองของ Azadi และคณะ [9] ไปในทางเดียวกัน จึงสามารถนำโมเดลและภาวะต่างๆ ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณไปใช้สำหรับไซโคลนในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งภาวะขอบเขต (boundary condition) ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) แสดงดังตารางที่ 3.2 ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเท่ากับ 0.000006 และสำหรับไซโคลนขนาดใหญ่ (cyclone II) มีสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเท่ากับ 0.0006 โดยในส่วนถัดไปงานวิจัยนี้จะจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลนในระบบสามมิติในรูปร่างต่างๆ ที่มีขนาดและมิติเท่ากับไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I)



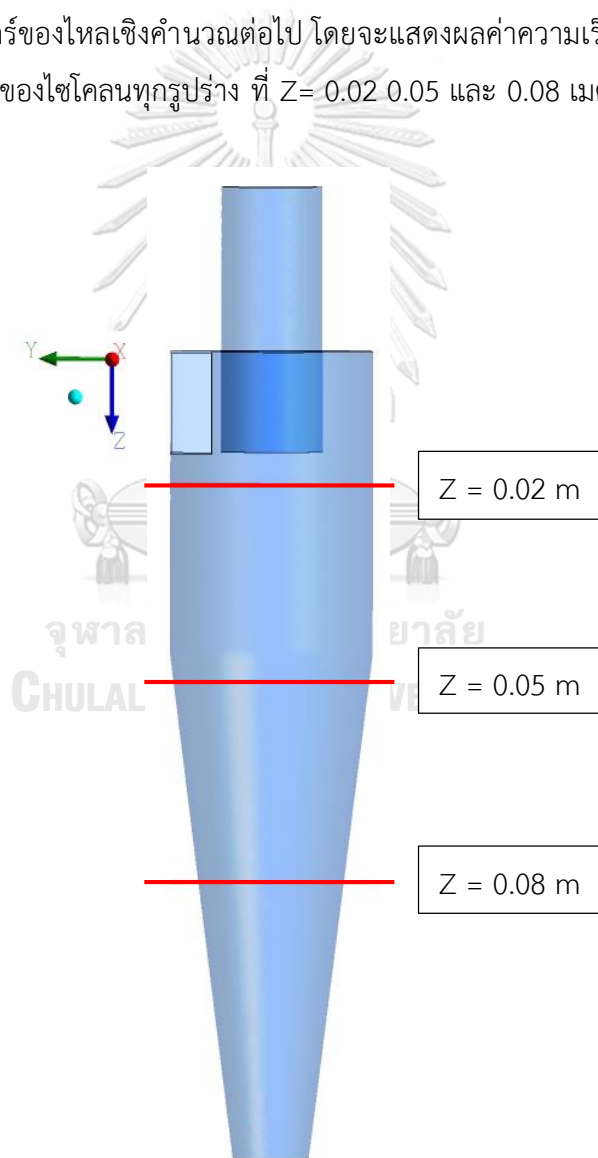
รูปที่ 4.3 ผลของความดันตกที่ความเร็วของทางเข้าต่างๆ จากการจำลองกระบวนการเทียบกับผลจากการทดลองของไซโคลนขนาดเล็ก Cyclone I



รูปที่ 4.4 ผลของความดันตกที่ความเร็วของทางเข้าต่างๆ จากการจำลองกระบวนการเทียบกับผลจากการทดลองของไซโคลนขนาดใหญ่ Cyclone II

4.2 การศึกษาผลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ

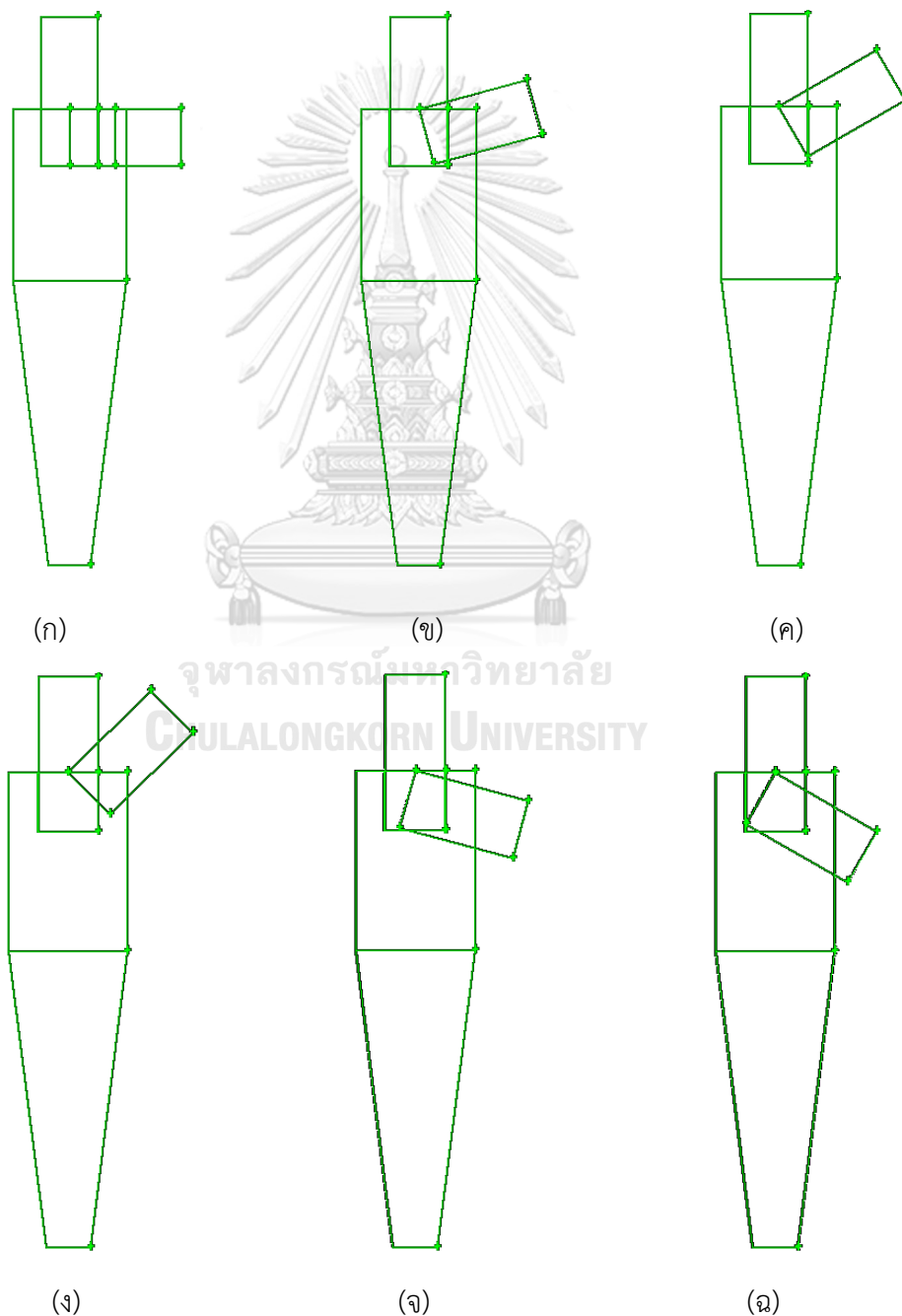
ลักษณะของไซโคลนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะของไซโคลนนั้นๆ จึงเป็นที่มาให้มีหลายงานวิจัยมาให้ความสำคัญกับการออกแบบ ปรับเปลี่ยนรูปร่าง และปรับสัดส่วนต่างๆ ของไซโคลน ดังแสดงที่ตาราง 2.2 นอกจากนี้ปัจจัยเรื่องลักษณะของไซโคลนแล้ว ก็ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของทางเข้าไซโคลน ความเร็วเปลี่ยนของผนังภายในไซโคลน และจำนวนรอบของการเกิดกระแสวนภายในไซโคลน เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาการปรับเปลี่ยนรูปร่างของไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) โดยมีไซโคลนสแตมานเป็นรูปร่างพื้นฐาน และอาศัยภาวะและปัจจัยจากการทดลองของ Azadi และคณะ [9] เป็นต้นแบบในการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณต่อไป โดยจะแสดงผลค่าความเร็วต่างๆ และสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง ของไซโคลนทุกรูปร่าง ที่ $Z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร ตามลำดับ ดังแสดงที่รูป 4.5

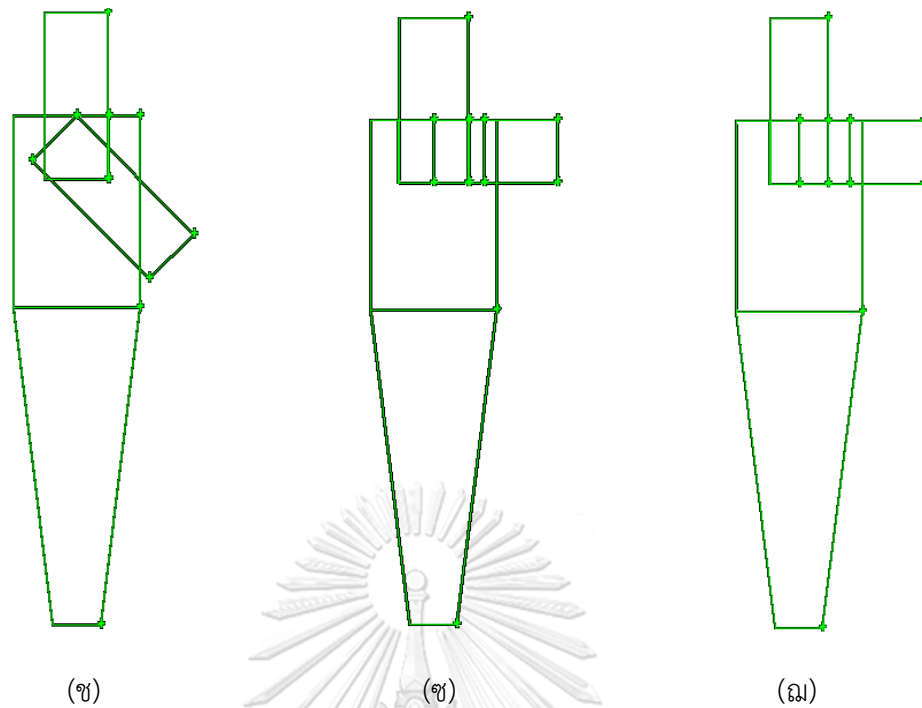


รูปที่ 4.5 ตำแหน่งแสดงผลของความเร็วต่างๆ และสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ $Z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร

4.2.1 ไชโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตัดแปลงจากไชโคลนสแตमान

ในงานวิจัยนี้จะปรับรูปร่างของไชโคลนสแตमानสองส่วน คือ การปรับมุมของทางเข้าของแก๊ส (angle of inlet) โดยปรับมุมขึ้นสามแบบคือ 15 30 และ 45 องศา ปรับมุมลดสามแบบคือ 15 30 และ 45 องศา และปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของแก๊ส (diameter of vortex finder) โดยเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของแก๊ส 10% เทียบกับขนาดของไชโคลนสแตमान และลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของแก๊ส 10% เทียบกับขนาดของไชโคลนสแตमान ดังแสดงที่รูป 4.6ก-4.6ง



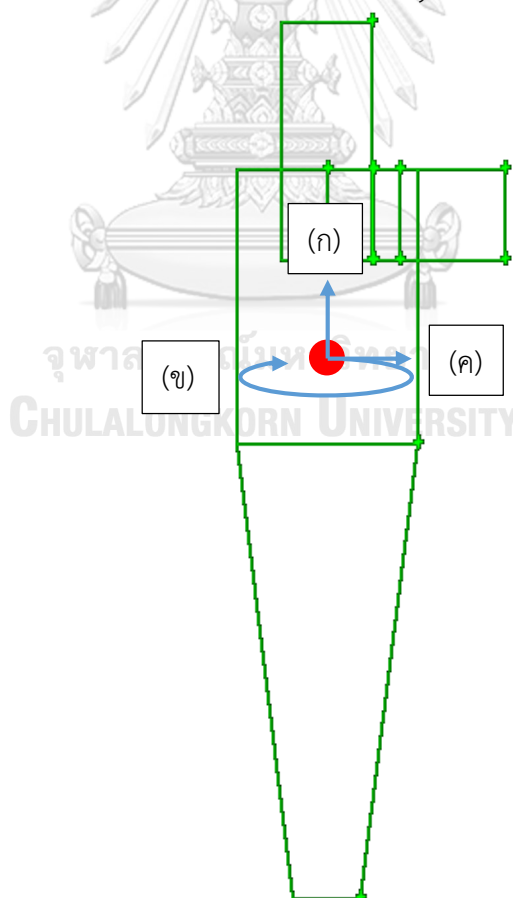


รูปที่ 4.6 โครงสร้างของไซโคลนในระบบสามมิติในรูปร่างต่างๆ จากโปรแกรม GAMBIT 2.2.30

- (ก) ไซโคลนสเตมมาน (Stairmand high efficiency cyclone หรือ cyclone I)
- (ข) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา (cyclone_in15)
- (ค) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา (cyclone_in30)
- (ง) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา (cyclone_in45)
- (จ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา (cyclone_in_mi15)
- (ฉ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา (cyclone_in_mi30)
- (ช) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา (cyclone_in_mi45)
- (ซ) ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_inVF10%) และ
- (ฅ) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

4.2.2 การศึกษาพฤติกรรมของการไหลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ

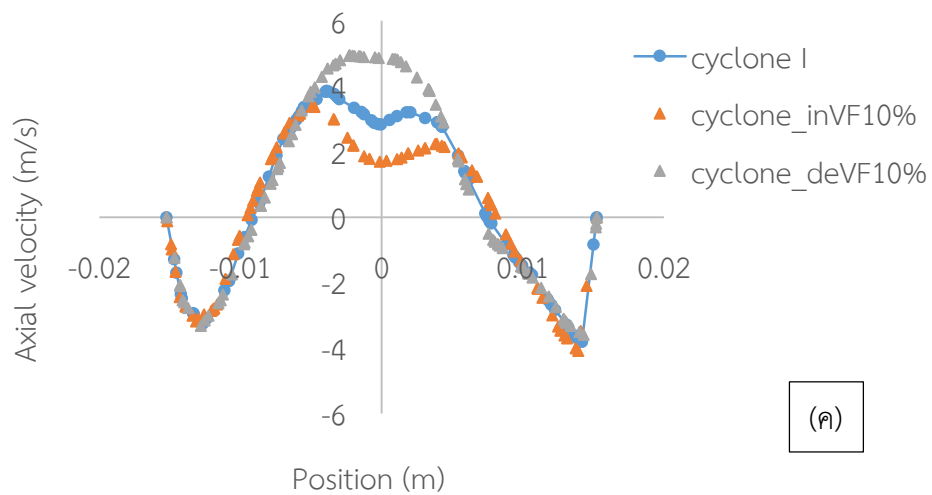
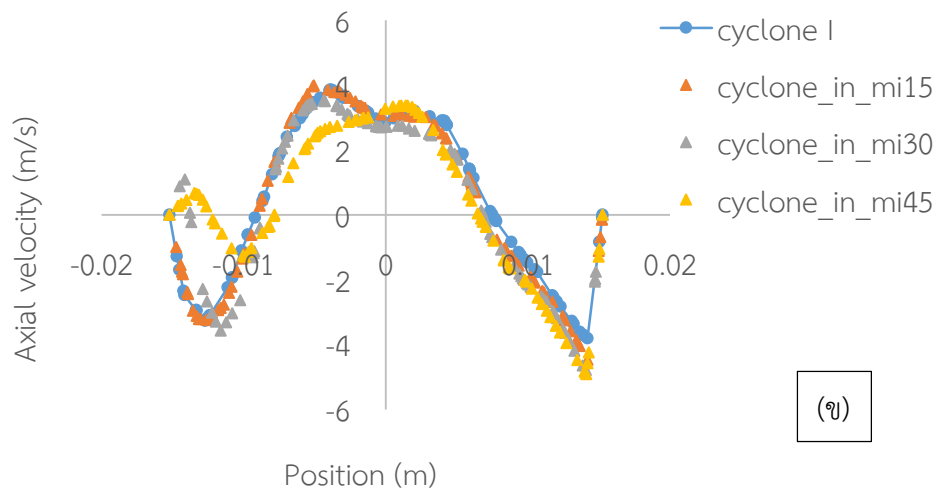
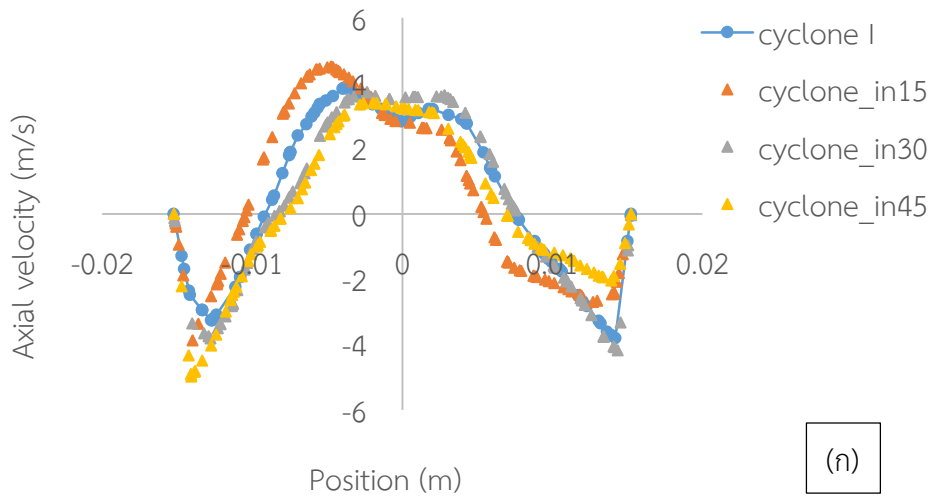
การศึกษาพฤติกรรมและรูปแบบการไหลภายในไซโคลนรูปแบบต่างๆ (flow pattern) สามารถพิจารณาจากการกระจายตัวของความดันสถิต (static pressure) และสนามความเร็ว (velocity fields) โดยความเร็วในการไหลของของไหล (fluid flow) ในไซโคลนจะประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ดังแสดงรูปที่ 4.7 ได้แก่ 1. ความเร็วแนวแกน (axial velocity) ดังรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 คอนทัวร์ความเร็วแนวแกน ดังแสดงรูปที่ 4.11 2. ความเร็วแนวสัมผัส (tangential velocity) ดังรูปที่ 4.12 4.13 และ 4.14 คอนทัวร์ความเร็วแนวสัมผัส ดังแสดงรูปที่ 4.15 และ 3. ความเร็วแนวรัศมี (radial velocity) ดังรูปที่ 4.16 4.17 และ 4.18 คอนทัวร์ความเร็วแนวรัศมี ดังแสดงรูปที่ 4.19 คอนทัวร์ของความดันสถิต ดังแสดงรูปที่ 4.20 เวกเตอร์ของความเร็วในไซโคลน ดังแสดงรูปที่ 4.21 และสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง ดังรูปที่ 4.22 4.23 และ 4.24 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง ดังแสดงรูปที่ 4.25 เพื่อศึกษาความเร็วและทิศทางของการไหลที่เกิดขึ้นภายในไซโคลน โดยกราฟจะพิจารณาที่ตำแหน่ง $z=0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร ตามลำดับ และคอนทัวร์ต่างๆ จะพิจารณาที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz ของไซโคลนทุกรูปารวมทั้งไซโคลนสแตมาน (cyclone I)



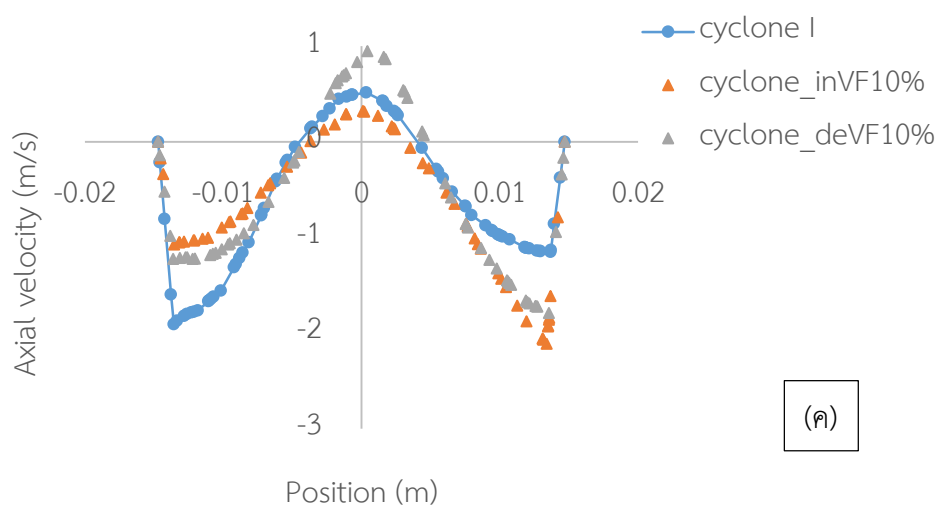
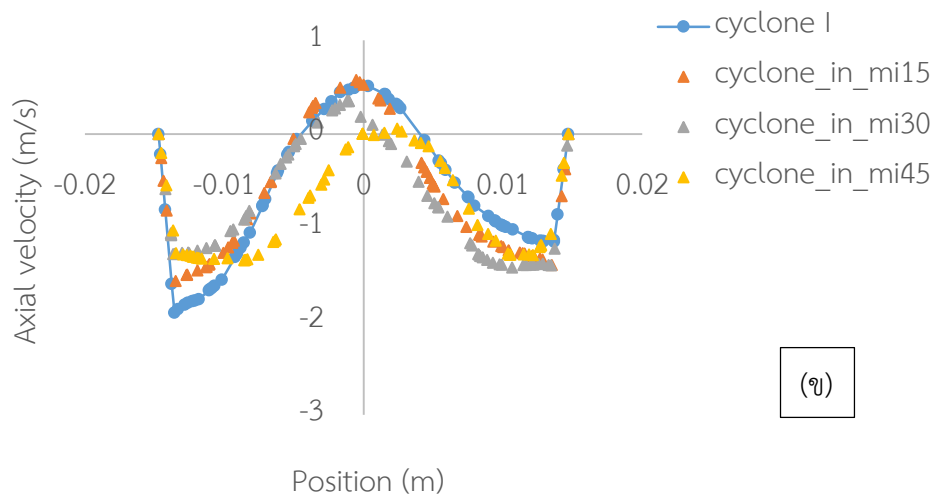
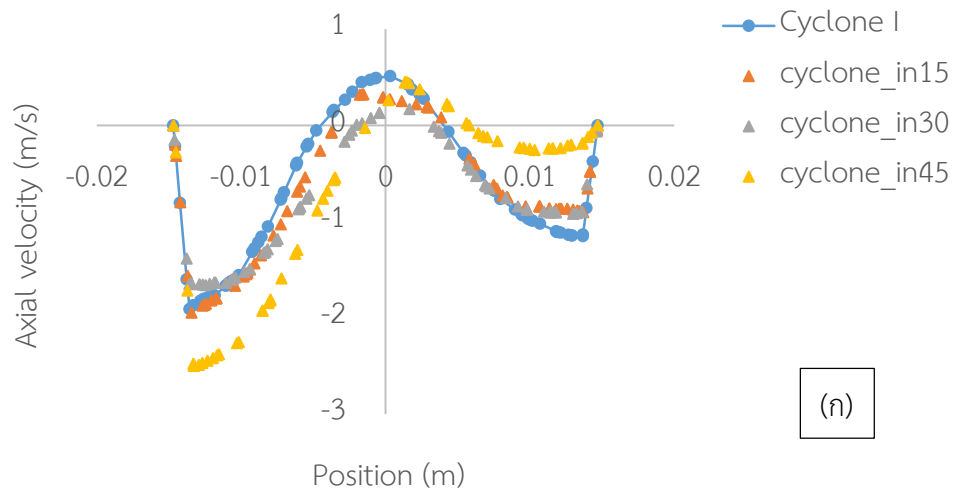
รูปที่ 4.7 การไหลของแก๊สและอนุภาคในทิศทางต่างๆ ภายในไซโคลน (ก) การไหลในแนวแกน (ข) การไหลในแนวสัมผัส และ (ค) การไหลในแนวรัศมี

4.2.2.1 ผลของความเร็วในแนวแกน (axial velocity) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ เทียบกับไซโคลนสแตมมาน ที่ $z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร

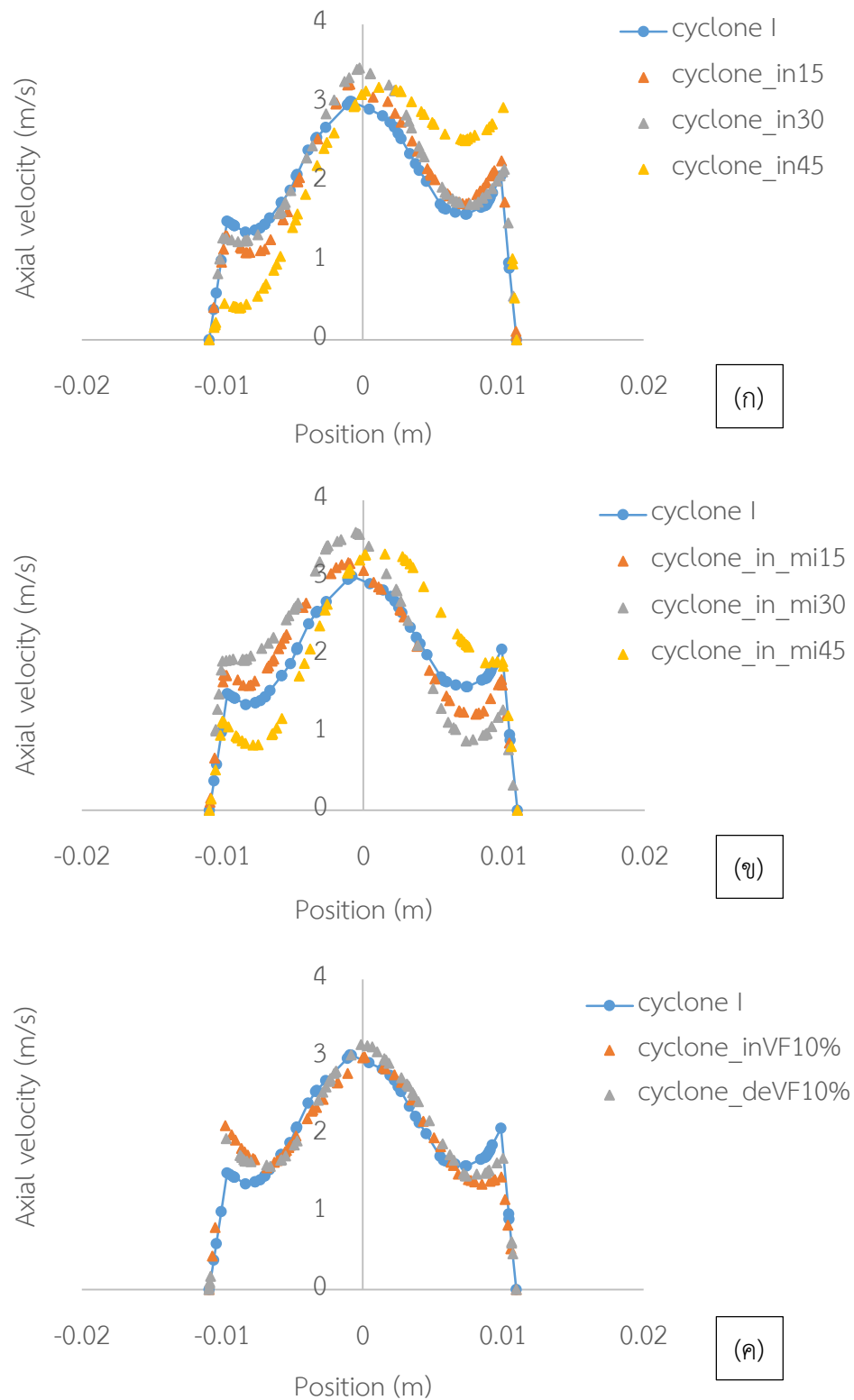
ความเร็วแนวแกน (axial velocity) เป็นความเร็วที่มีความสำคัญที่สามารถอธิบายการไหลของแก๊ส รวมถึงการแยกของอนุภาคของไซโคลน รูปแบบของความเร็วแนวแกนที่บริเวณตัวไซโคลน (cyclone body) ก่อนท่อทางออกของแก๊ส (vortex finder) จะมีรูปแบบคล้ายตัว “M” จะเป็นผลให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่ดี และไม่ทำให้เกิด short circuiting คือการที่อนุภาคของแข็งหลุดออกที่ทางออกด้านบนของไซโคลน (vortex finder) [2] โดยมีทิศทางไหลขึ้นสู่ด้านบนของไซโคลน [4,7] จากรูปที่ 4.8(ก)-4.8(ค) แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบของความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมมาน หรือไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) กับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10% จากไซโคลนสแตมมานขนาดเล็ก (cyclone I) ที่ตำแหน่ง $z=0.02$ เมตร พบว่าความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมมานมีทิศทางในการไหล 2 บริเวณคือ กระแสภายนอก (outer vortex) และกระแสภายใน (inner vortex) ที่บริเวณกระแสภายนอกมีทิศทางการเคลื่อนที่ลงตามแรงโน้มถ่วง และแรงเหวี่ยงจากทางเข้าของไซโคลน และบริเวณกระแสภายในมีทิศทางการเคลื่อนที่สวนแรงโน้มถ่วงไปสู่ทางออก (vortex finder) จากกราฟมีความเร็วแนวแกนประมาณ 4 เมตรต่อวินาที โดยจากกราฟสังเกตว่ามีไซโคลน 2 รูปแบบที่มีความเร็วแนวแกนสูงกว่าไซโคลนสแตมมาน คือ ไซโคลนที่มีมุมทางเข้าเพิ่ม 15 องศา และ ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกแก๊สลดลง 10% มีค่าประมาณ 4.8 และ 5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ รูปที่ 4.9(ก)-4.9(ค) แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบของความเร็วแนวแกนที่ตำแหน่ง $z=0.05$ เมตร พบว่าที่ตำแหน่งนี้ความเร็วแนวแกนที่บริเวณด้านนอกจะมีค่าสูงและทิศทางเคลื่อนที่ลงด้านล่างของไซโคลน เนื่องจากอยู่ใกล้รอยต่อไปสู่ส่วนกรวยของไซโคลน ไซโคลนที่เพิ่มมุมของทางเข้า 45° (cyclone_in45) จากรูป 4.9(ก) มีค่าความเร็วแนวแกนสูงสุดประมาณ 2.5 เมตรต่อวินาที และ รูปที่ 4.10(ก)-4.10(ค) แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบของความเร็วแนวแกนที่ตำแหน่ง $z=0.08$ เมตร พบว่าที่ตำแหน่งนี้สำหรับไซโคลนทุกรูปร่างความเร็วแนวแกนมีทิศทางไหลขึ้นด้านบนของไซโคลนเนื่องจากเป็นบริเวณส่วนกรวย มีความเร็วประมาณ 3 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.8 ความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมมาน ที่ $z=0.02$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%



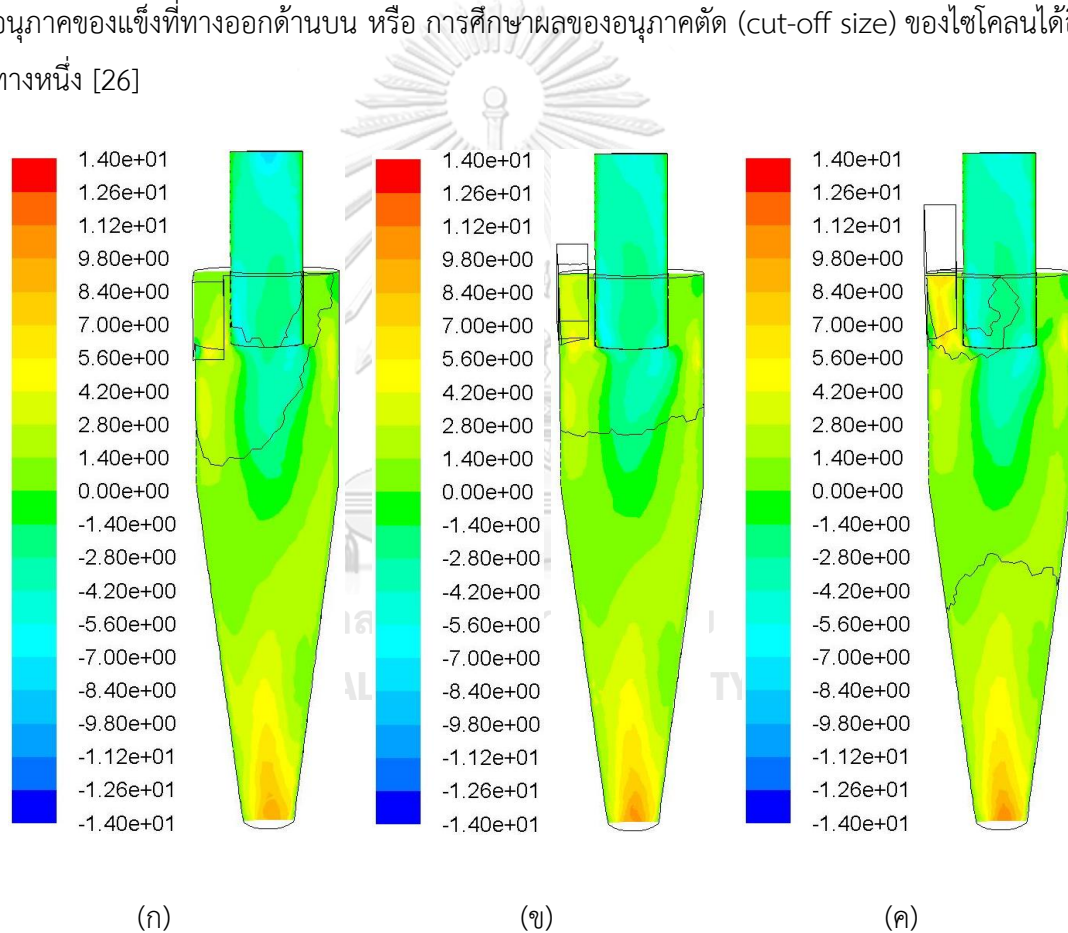
รูปที่ 4.9 ความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.05$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

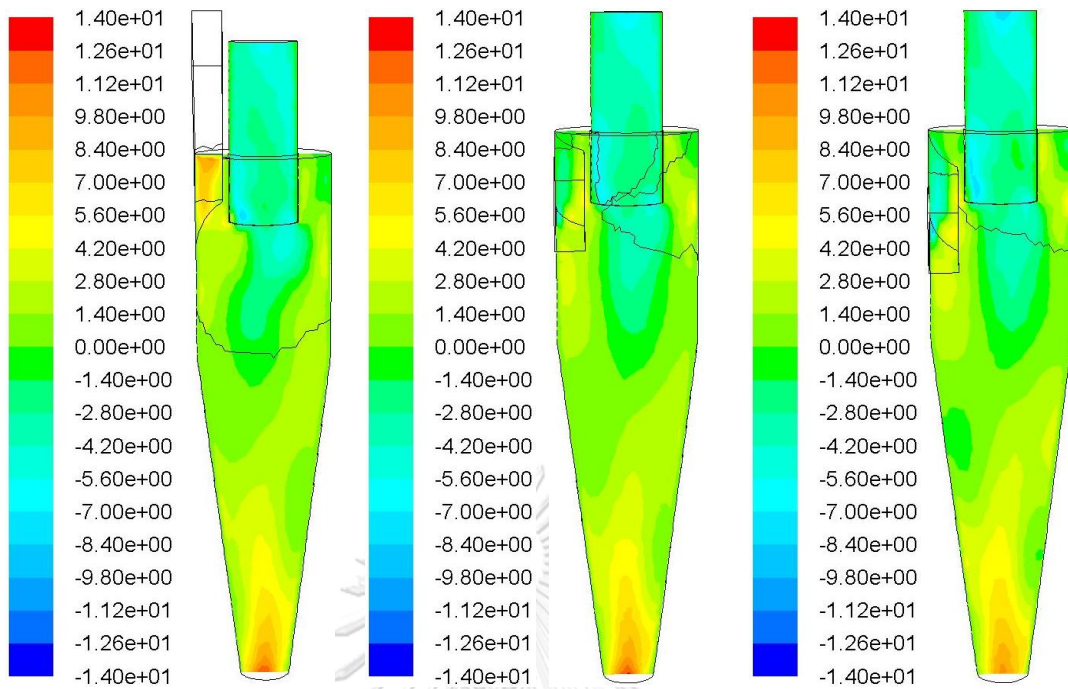


รูปที่ 4.10 ความเร็วแนวแกนของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.08$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

คอนทัวร์ของความเร็วนวแกน (contour of axial velocity)

จากรูปที่ 4.11 พบว่ารูปแบบความเร็วนวแกนของไซโคลนในทุกๆ รูปแบบมีความคล้ายคลึงกันซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่บริเวณทางออกด้านล่างของไซโคลน (dust outlet) ตรงกลางจะมีความเร็วสูงเป็นการดันให้กระแสของแก๊สไหลย้อนกลับไปด้านบนของไซโคลน ซึ่งเป็นบริเวณที่เรียกว่า การเกิดกระแสมภายใน (inner vortex) เป็นกระแสที่ไหลย้อนกลับสวนกับแรงโน้มถ่วง (gravity) ที่ทำให้อนุภาคของแข็งตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลน เนื่องจากเป็นไซโคลนที่มีทางเข้าในแนวสัมผัสรูปแบบความเร็วนวแกนจึงไม่มีความสมมาตรกัน ซึ่งไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลน สำหรับประสิทธิภาพในการแยกนั้น (collection efficiency) สามารถศึกษาได้จากการหลุดออกของอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านบน หรือ การศึกษาผลของอนุภาคตัด (cut-off size) ของไซโคลนได้อีกทางหนึ่ง [26]

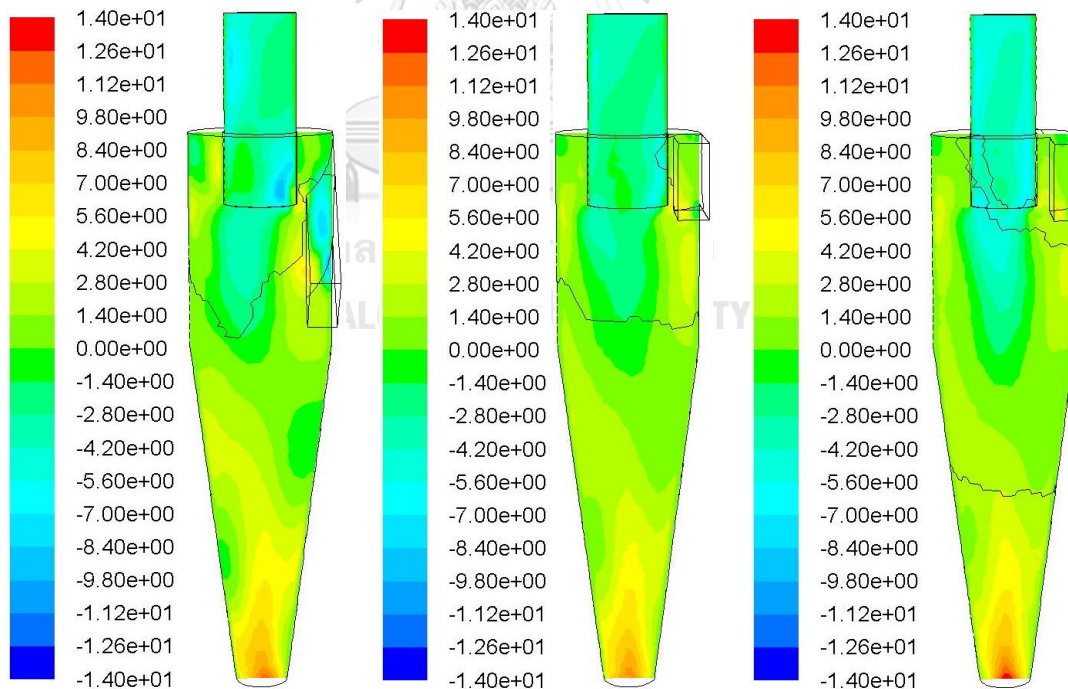




(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

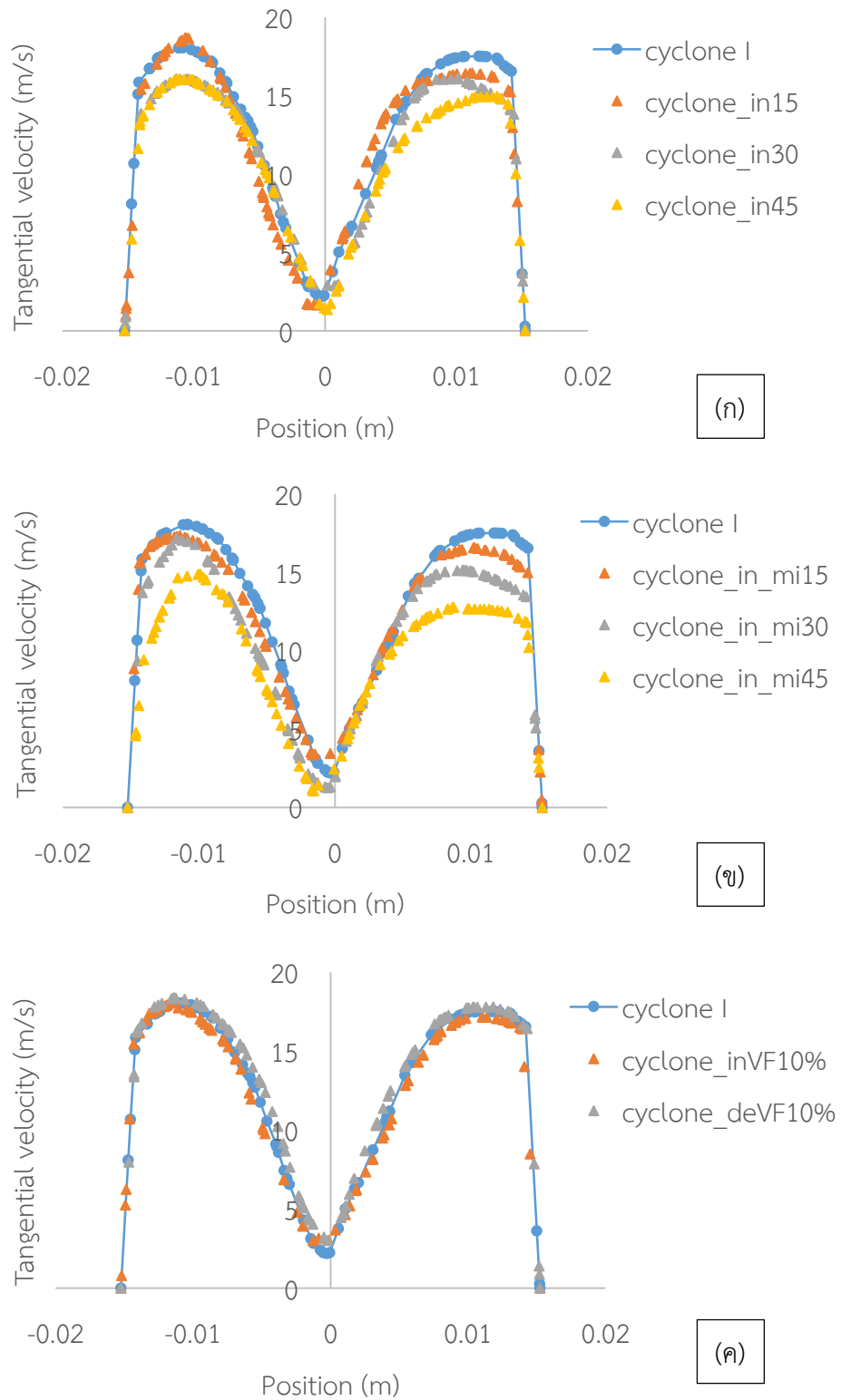
(f)

รูปที่ 4.11 คอนทัวร์ความเร็วแนวแกน (axial velocity) ที่ความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz

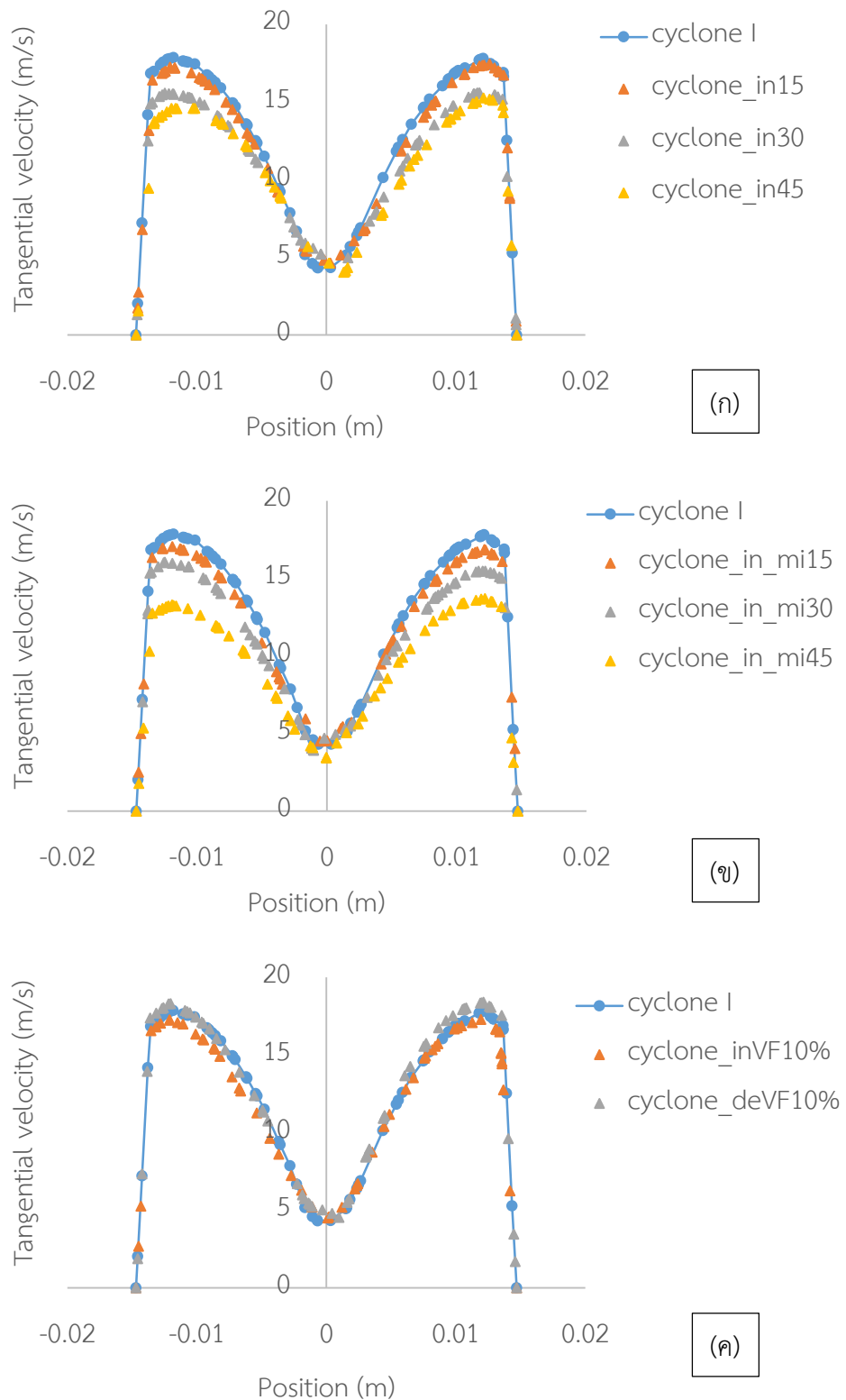
- (ก) ไซโคลนสแตมาน (Stairmand high efficiency cyclone หรือ cyclone I)
- (ข) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา (cyclone_in15)
- (ค) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา (cyclone_in30)
- (ง) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา (cyclone_in45)
- (จ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา (cyclone_in_mi15)
- (ฉ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา (cyclone_in_mi30)
- (ช) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา (cyclone_in_mi45)
- (ซ) ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_inVF10%) และ
- (ณ) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

4.2.2.2 ผลของความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ เทียบกับไซโคลนสแตมาน ที่ $z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร

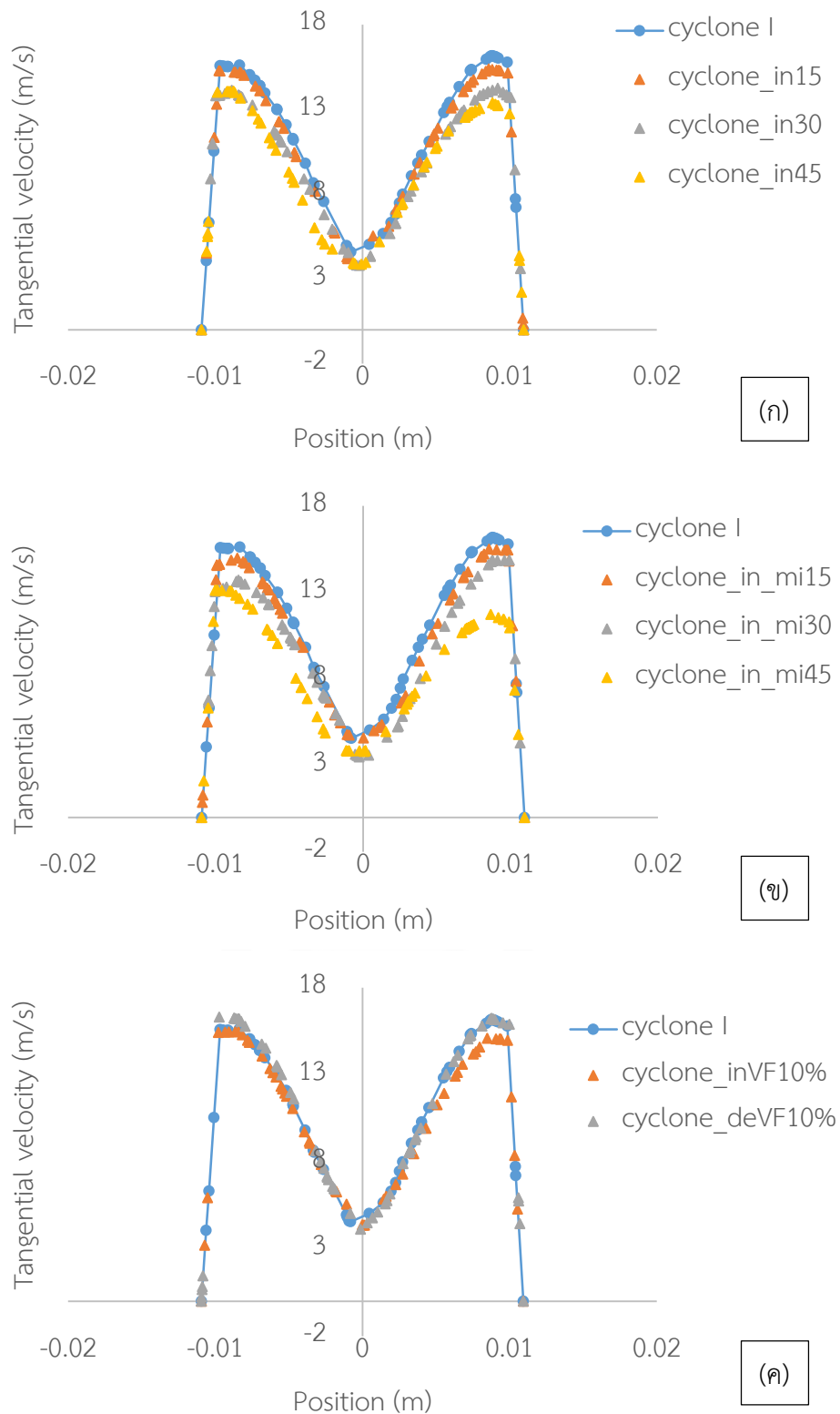
ความเร็วแนวสัมผัส (tangential velocity) จัดเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญมาก ซึ่งเป็นการอธิบายผลของแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในไซโคลนสำหรับการแยกอนุภาค (particle separation) ที่บริเวณแกนกลางของไซโคลน (core region) ความเร็วแนวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นในแนวรัศมี และจะลดลงที่บริเวณส่วนนอกของไซโคลน (outer part) เนื่องจากเกิดแรงเฉือนที่บริเวณผนังไซโคลน (wall friction) [4] รูปที่ 4.12(ก)-4.12(ค) แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบของความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนสแตมาน หรือไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) กับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10% จากไซโคลนสแตมานขนาดเล็ก (cyclone I) ที่ตำแหน่ง $z=0.02$ เมตร พบว่ารูปแบบความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนทุกรูปแบบมีลักษณะคล้ายกัน โดยบริเวณที่อยู่ติดกับผนังของไซโคลนจะมีความเร็วแนวสัมผัสเท่ากับ 0 เมตรต่อวินาที เนื่องมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผนังกับความเร็ว และที่บริเวณถัดจากผนังมาสู่แกนกลางของไซโคลนมีค่าความเร็วที่ประมาณ 15-18 เมตรต่อวินาที และมีไซโคลนให้รูปแบบของความเร็วแนวสัมผัสใกล้เคียงกับไซโคลนสแตมาน คือ ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกแก๊สลดลง 10% เท่านั้นที่ให้ความเร็วแนวสัมผัสสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.12(ค) โดยรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงกราฟของความเร็วแนวสัมผัสที่ตำแหน่ง $z=0.05$ และ 0.08 เมตร ตามลำดับ พบว่ารูปแบบของความเร็วสอดคล้องกับที่ตำแหน่ง $z=0.02$ เมตร



รูปที่ 4.12 ความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.02$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%



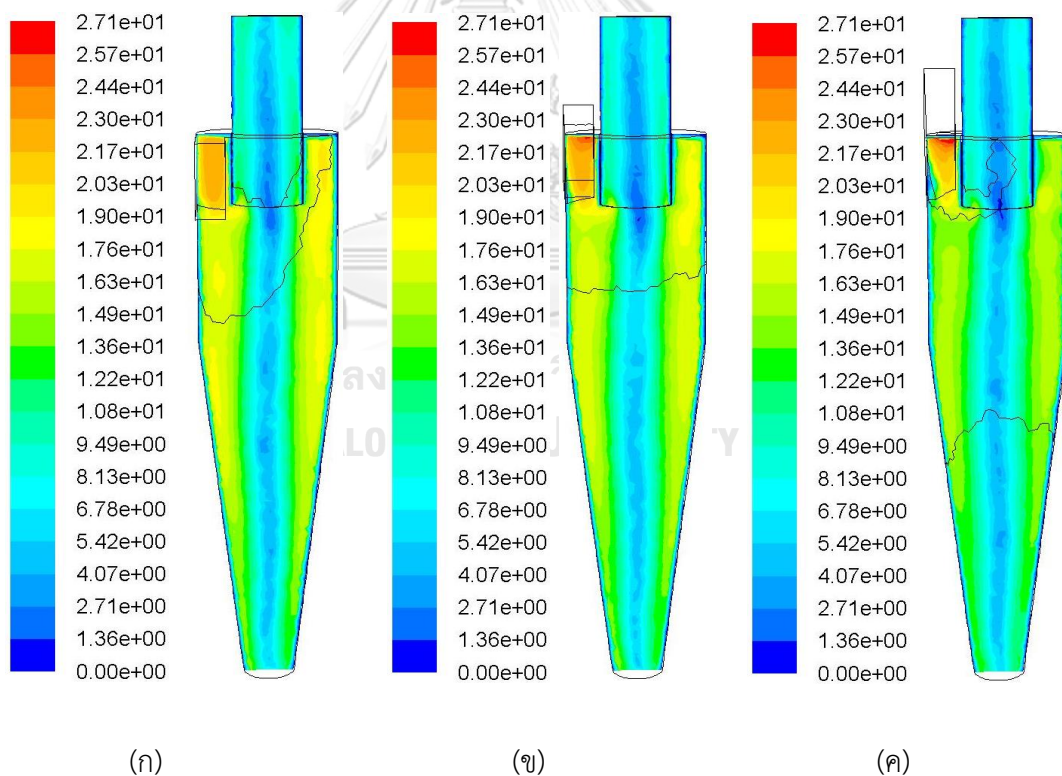
รูปที่ 4.13 ความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.05$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าชั้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

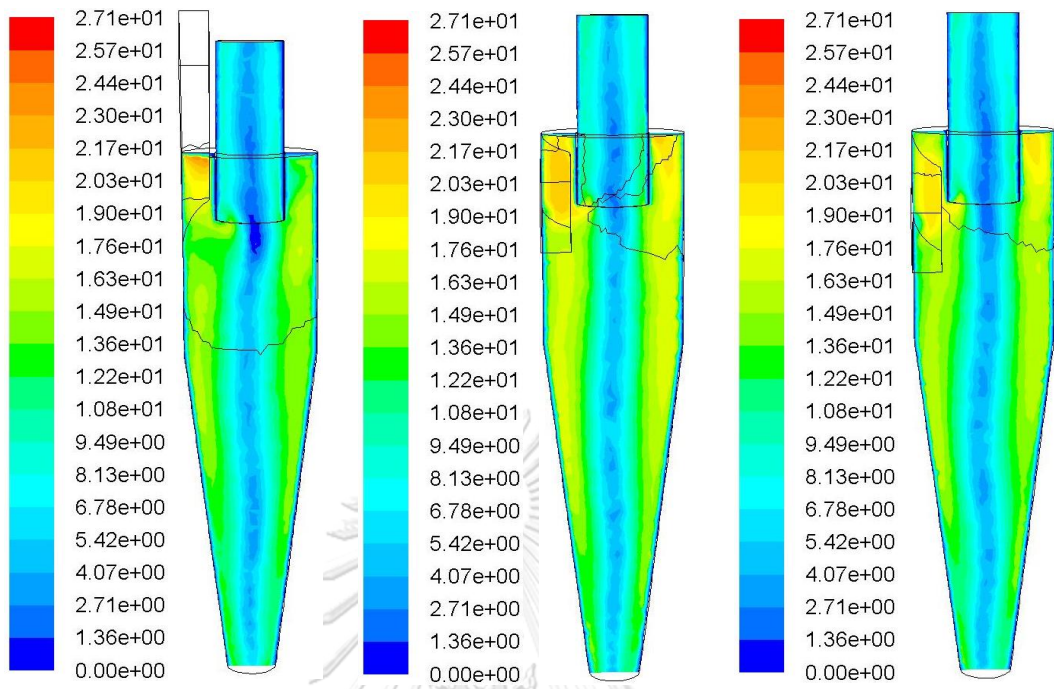


รูปที่ 4.14 ความเร็วแนวสัมผัสของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.08$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าชั้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

คอนทัวร์ความเร็วแนวสัมผัส (contour of tangential velocity)

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความเร็วแนวสัมผัสมีค่าค่อนข้างสูงที่บริเวณทางเข้าของแก๊ส และจากบริเวณแกนกลาง (core region) ของไซโคลนความเร็วแนวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นในแนวรัศมี และจะค่อยๆ ลดลงที่บริเวณส่วนนอกของไซโคลน (outer part) เนื่องจากแรงเฉือนที่ผนังของไซโคลน ที่บริเวณทางออกของแก๊ส (vortex finder) ความเร็วแนวสัมผัสจะลดลงในทิศทางสู่ทางออกของแก๊ส เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่น้อยจากแรงเหวี่ยง และอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่จะถูกแยกออกทางด้านล่างของไซโคลน (dust outlet) สำหรับบริเวณที่มีความเร็วแนวสัมผัสค่อนข้างสูง คือ บริเวณที่แก๊สเข้าสู่ตัวไซโคลนใกล้กับบริเวณทางออกของแก๊ส ซึ่งค่าที่สูงของความเร็วแนวสัมผัสภายในตัวของไซโคลนเป็นปัจจัยที่สามารถคาดคะเนถึงสมรรถนะของไซโคลนนั้นๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าประสิทธิภาพในการแยก (collection efficiency) คือ เมื่อความเร็วแนวสัมผัสสูงจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งดีขึ้น [4, 26]

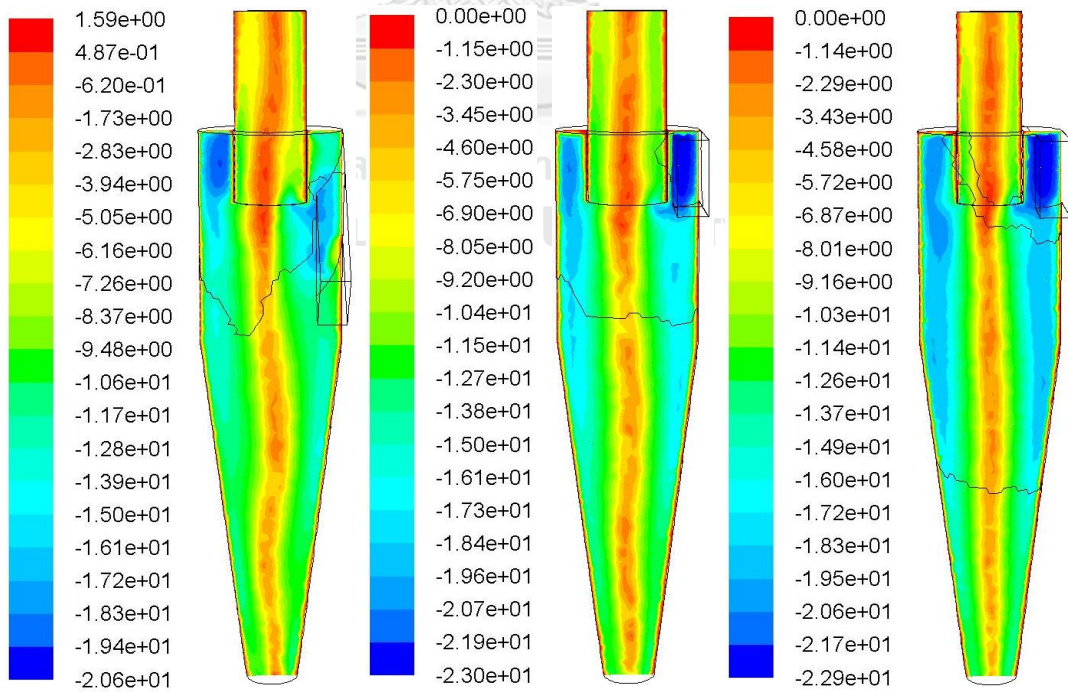




(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

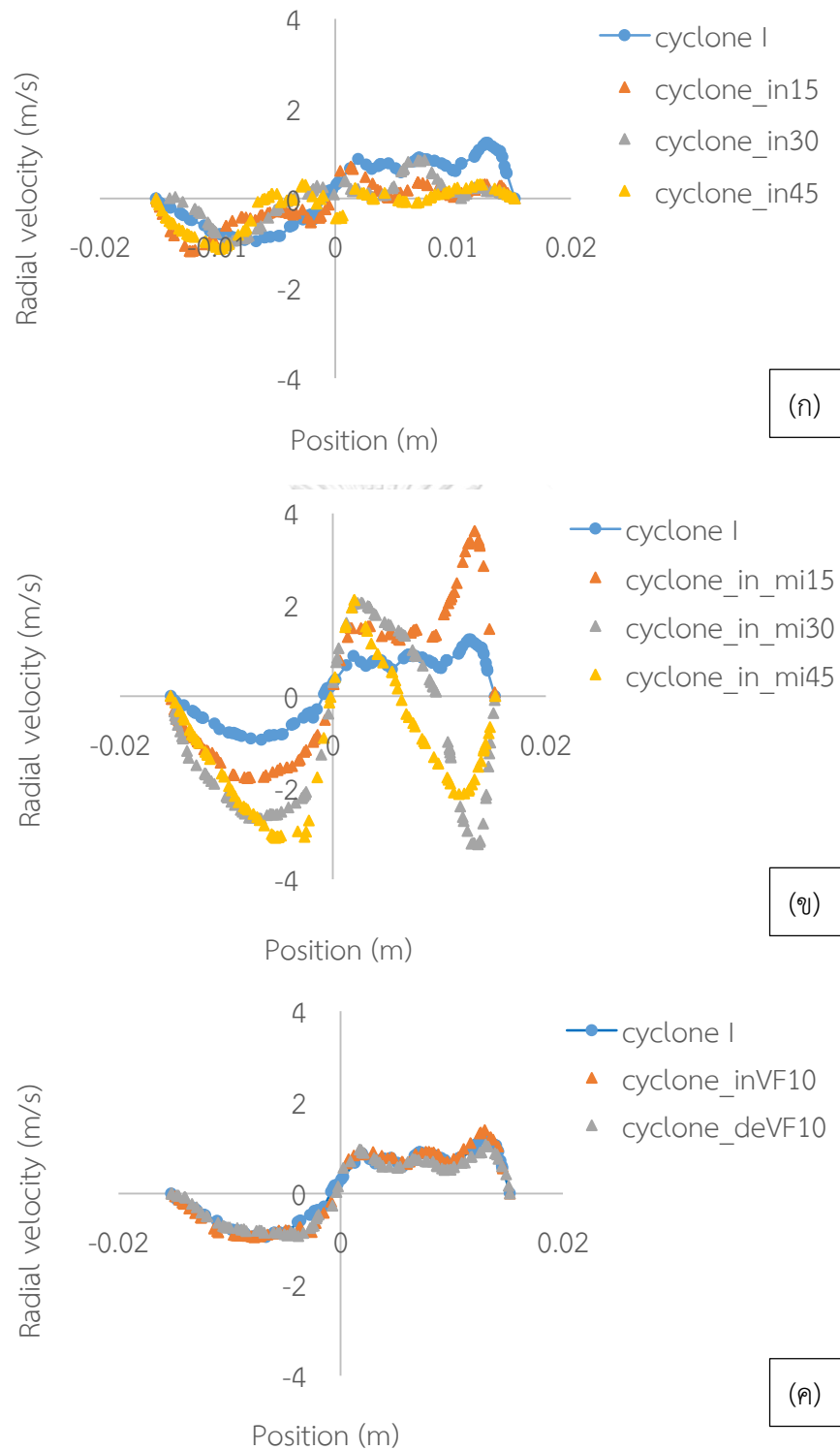
(f)

รูปที่ 4.15 คอนทัวร์ความเร็วแนวสัมผัส (tangential velocity) ที่ความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz

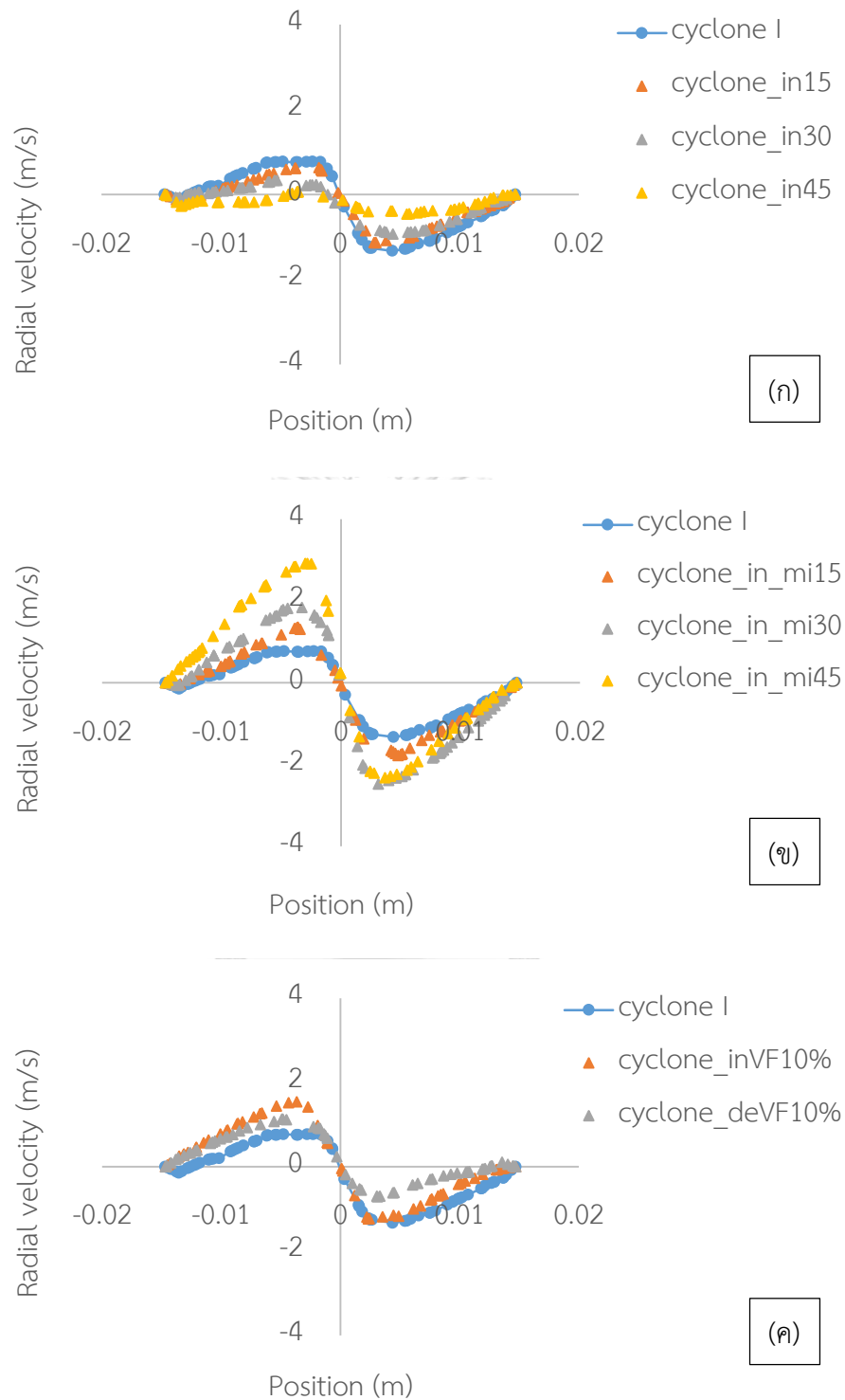
- (ก) ไซโคลนสแตมาน (Stairmand high efficiency cyclone หรือ cyclone I)
- (ข) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา (cyclone_in15)
- (ค) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา (cyclone_in30)
- (ง) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา (cyclone_in45)
- (จ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา (cyclone_in_mi15)
- (ฉ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา (cyclone_in_mi30)
- (ช) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา (cyclone_in_mi45)
- (ซ) ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_inVF10%) และ
- (ฌ) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

4.2.2.3 ผลของความเร็วในแนวรัศมี (radial velocity) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ เทียบกับไซโคลนสแตมาน ที่ตำแหน่ง $z = 0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร

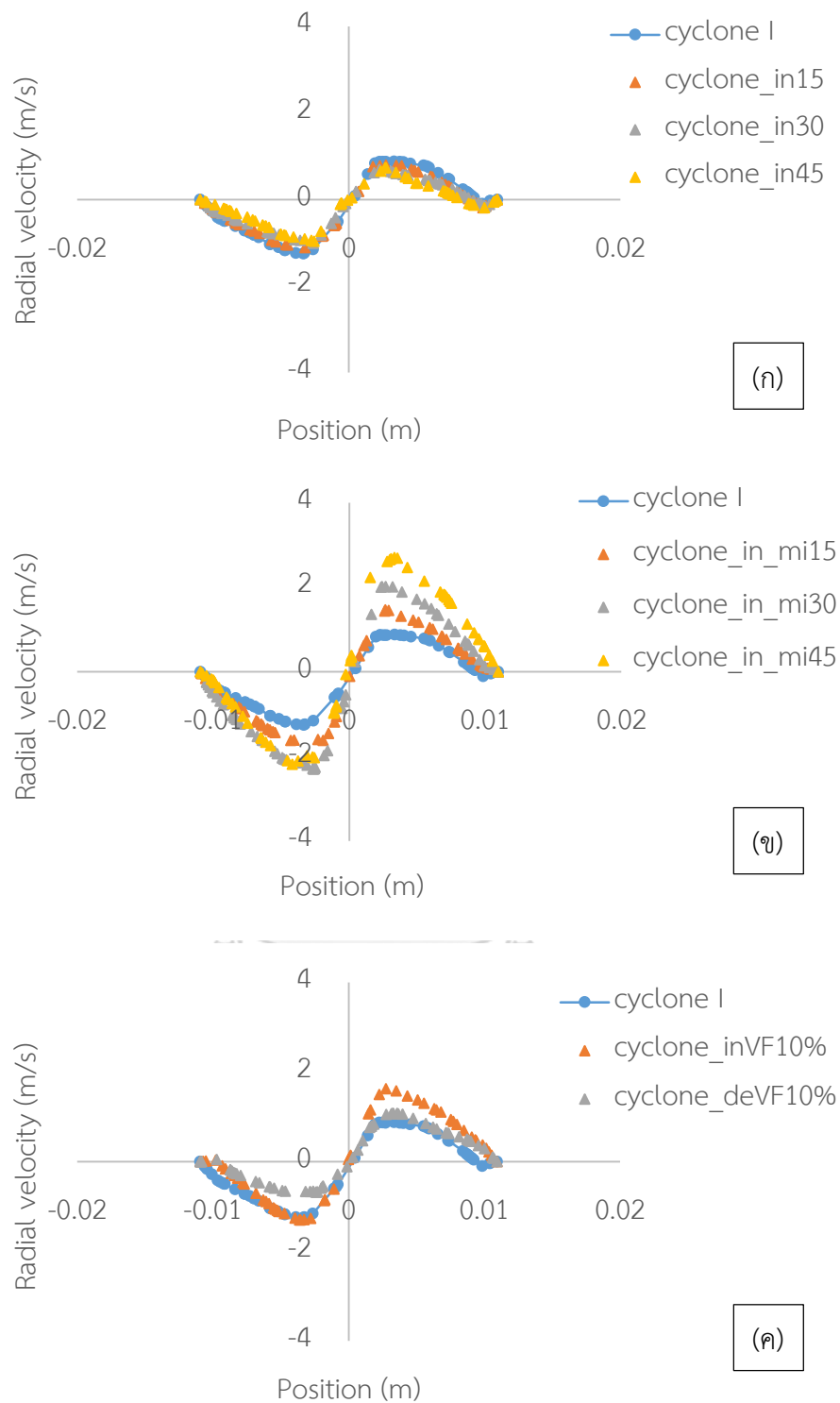
ความเร็วแนวรัศมี (radial velocity) เป็นผลจาก particle bypass และมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์สำหรับการแยกอนุภาค (particle separation) และการสูญเสียประสิทธิภาพของไซโคลน (losses of efficiency) ที่บริเวณส่วนใน (inner region) มีการกระจายตัวของความเร็วแนวรัศมีด้านหนึ่งเป็นบวก (positive) และอีกด้านเป็นลบ (negative) ซึ่งจะพิจารณาการไหลจากบริเวณแกนกลางของไซโคลนออกสู่ผนัง (core region to wall) และที่บริเวณใต้ทางออกของแก๊ส (vortex finder) จะเกิดการไหลแบบ lip leakage ซึ่งทำให้แก๊สที่บริเวณขอบของ vortex finder มีการไหลสวนทางกันกับการไหลลงของแก๊สจากบริเวณผนังของทรงกระบอกเป็นผลให้เกิด short-circuiting flow ซึ่งถือเป็นหนึ่งองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพของไซโคลน [4, 6, 27] รูปที่ 4.16(ก)-4.16(ค) แสดงกราฟเปรียบเทียบรูปแบบของความเร็วแนวรัศมีของไซโคลนสแตมาน หรือไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) กับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10% จากไซโคลนสแตมานขนาดเล็ก (cyclone I) ที่ตำแหน่ง $z=0.02$ เมตร รูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นผลของความเร็วแนวสัมผัสที่ตำแหน่ง 0.05 และ 0.08 เมตรตามลำดับ จากกราฟพบว่ารูปแบบความเร็วแนวรัศมีด้านหนึ่งเป็นบวก ด้านหนึ่งเป็นลบ เกิดจากแรงเหวี่ยงภายในไซโคลน และที่บริเวณผนังความเร็วแนวรัศมีจะเท่ากับ 0 เมตรต่อวินาที เนื่องจากแรงเฉือน



รูปที่ 4.16 ความเร็วแนวรัศมีของไซโคลนสแตมมาน ที่ $z=0.02$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าชั้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%



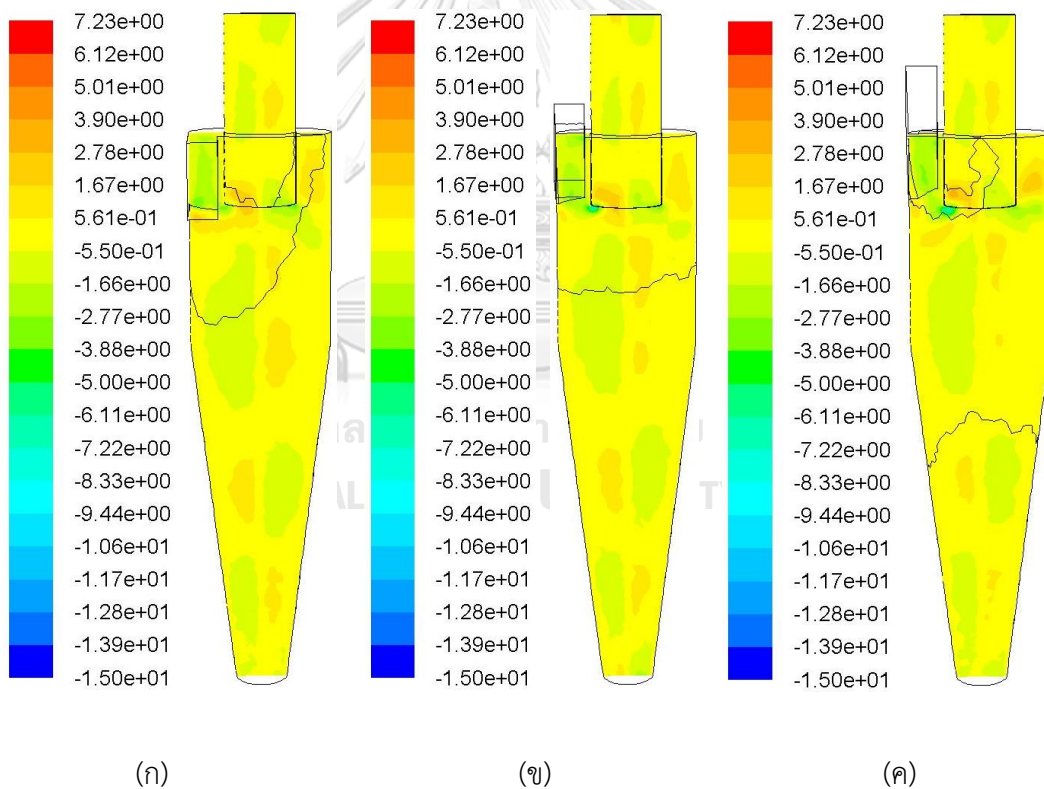
รูปที่ 4.17 ความเร็วแนวรัศมีของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.05$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าชั้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

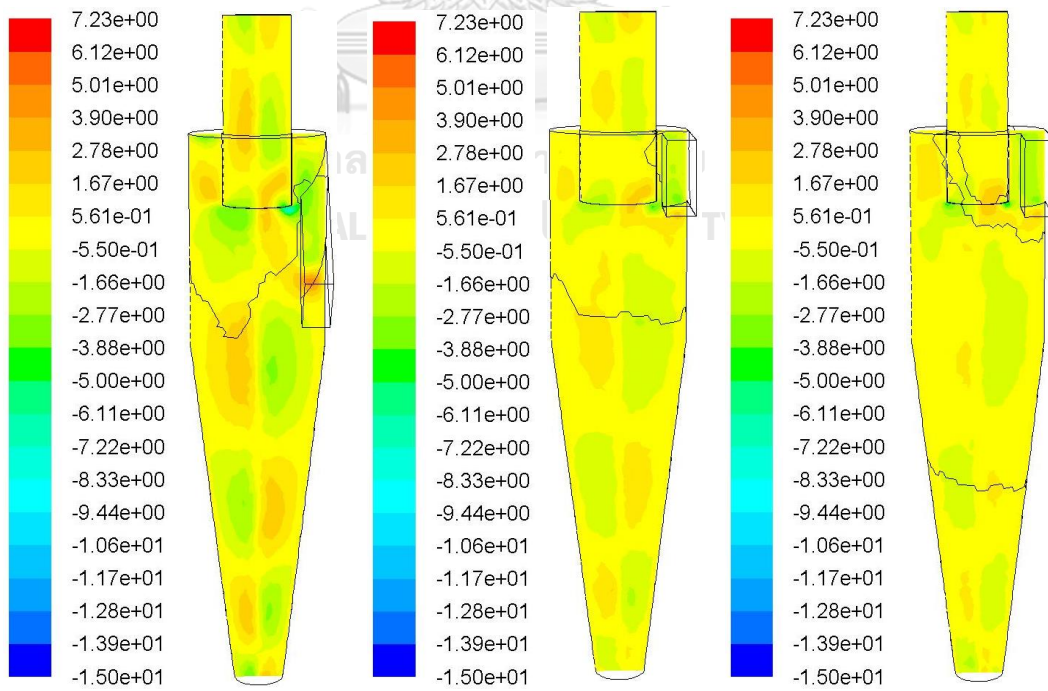
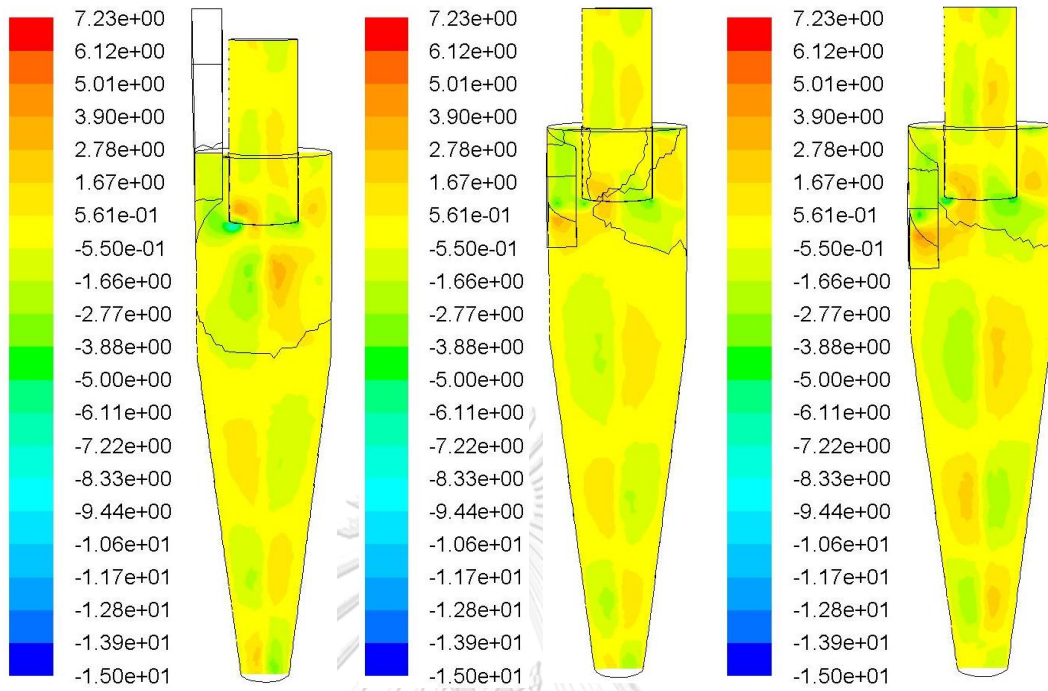


รูปที่ 4.18 ความเร็วแนวรัศมีของไซโคลนสแตมมาน ที่ $z=0.08$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

คอนทัวร์ความเร็วแนวรัศมี (contour of radial velocity)

จากรูปที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของความเร็วในแนวรัศมีของไซโคลนทุกรูปร่าง พฤติกรรมของความเร็วแนวรัศมีที่บริเวณทรงกระบอกของไซโคลน (cylindrical) ใต้ทางออกของแก๊ส (vortex finder) มีการไหลแบบ short-circuiting ที่อาจเป็นอุปสรรคต่อประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลน ที่บริเวณด้านล่างของขอบ vortex finder เกิดการรั่วซึมบริเวณปาก (lip leakage) และบริเวณใต้ทางออกของแก๊ส ความเร็วแนวรัศมีเป็นการไหลเข้าด้านในไซโคลนจากทางเข้า (ค่าเป็นลบ) แต่เนื่องจากผลของแรงเหวี่ยงรอบๆ vortex finder ค่าของความเร็วแนวรัศมีจะเปลี่ยนเป็นศูนย์ที่บริเวณแกนกลางของไซโคลนและกลายเป็นบวก ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของไซโคลนและอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของไซโคลน ดังนั้น ค่าและรูปแบบความเร็วแนวรัศมีต้องมีค่าน้อยๆ จึงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกดีขึ้น [4, 25]



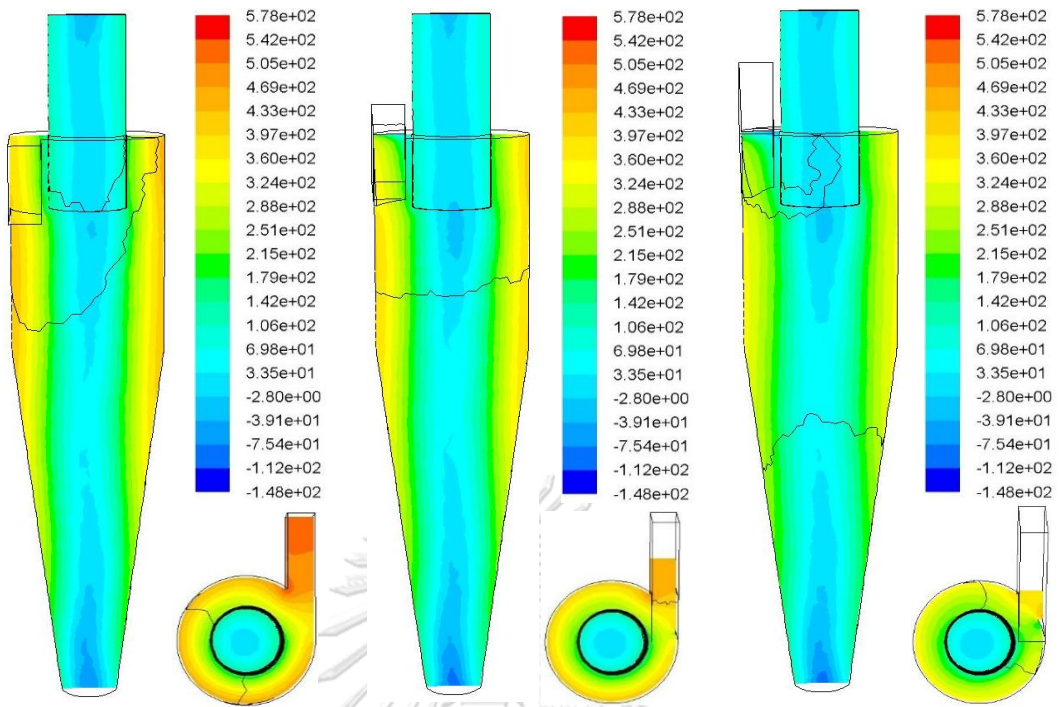


รูปที่ 4.19 คอนทัวร์ความเร็วแนวรัศมี (radial velocity) ที่ความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz

- (ก) ไซโคลนสแตมาน (Stairmand high efficiency cyclone หรือ cyclone I)
- (ข) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา (cyclone_in15)
- (ค) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา (cyclone_in30)
- (ง) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา (cyclone_in45)
- (จ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา (cyclone_in_mi15)
- (ฉ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา (cyclone_in_mi30)
- (ช) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา (cyclone_in_mi45)
- (ซ) ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_inVF10%) และ
- (ณ) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

4.2.2.4 ความดันสถิต (static pressure)

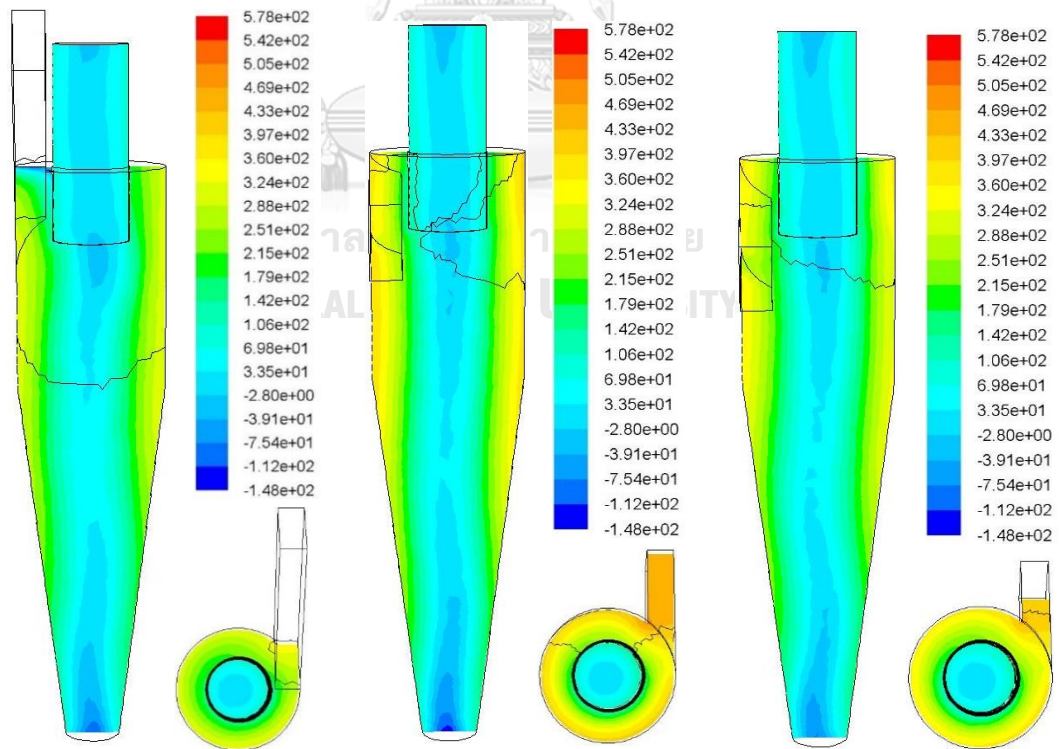
คอนทัวร์ของความดันสถิต (static pressure) เป็นการบอกรูปแบบของสนามความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแก๊ส-ของแข็งในไซโคลน จากภาพแสดงการกระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นในไซโคลน ซึ่งสามารถบอกได้ว่าที่บริเวณใดมีความดันสถิตสูงและแสดงว่าบริเวณมีปริมาณของแข็งอยู่มาก จากรูปที่ 4.20 รูปแบบของความดันสถิตของไซโคลนในทุกรูปร่างจะมีลักษณะคล้ายกันคือ แก๊สจะมีการเคลื่อนที่จากบริเวณส่วนนอกของไซโคลน (outer region) ไปยังส่วนในของไซโคลน (inner region) สังเกตจากสีที่บริเวณผนังของไซโคลนจะมีสีแดงและไล่สีจนเป็นสีฟ้าที่บริเวณส่วนในนั่นเอง โดยความเร็วที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนนั้นถูกเร่งตามหลักของการอนุรักษ์โมเมนตัม และรูปแบบของความดันสถิต (static pressure) จะลดลงตามแนวรัศมีจากบริเวณผนังของไซโคลน สู่ส่วนกลางของไซโคลน เนื่องจากเกิดแรงเหวี่ยง (centrifugal) จากกระแสนวนของของไหล และที่บริเวณแกนกลางของไซโคลน (central region) ของไซโคลนทุกรูปร่างเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำ (low-pressure zone) จากรูปพบว่าไซโคลนมาตรฐาน Cyclone I (รูปที่ 4.20ก) และไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (รูปที่ 4.20ณ) มีความดันสถิตเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในไซโคลนสูงซึ่งบ่งชี้ได้ว่าไซโคลนรูปแบบนี้จะมีอนุภาคของแข็งภายในไซโคลนมาก



(ก)

(ข)

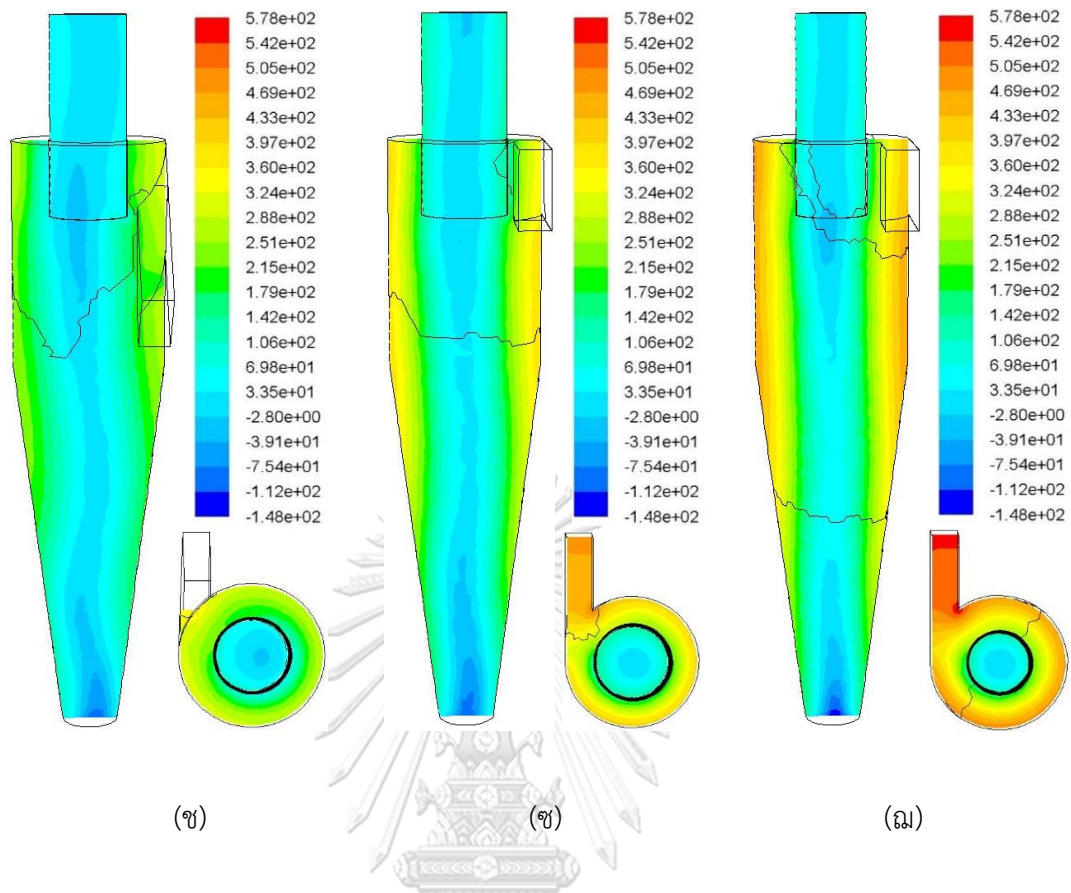
(ค)



(ง)

(จ)

(ฉ)

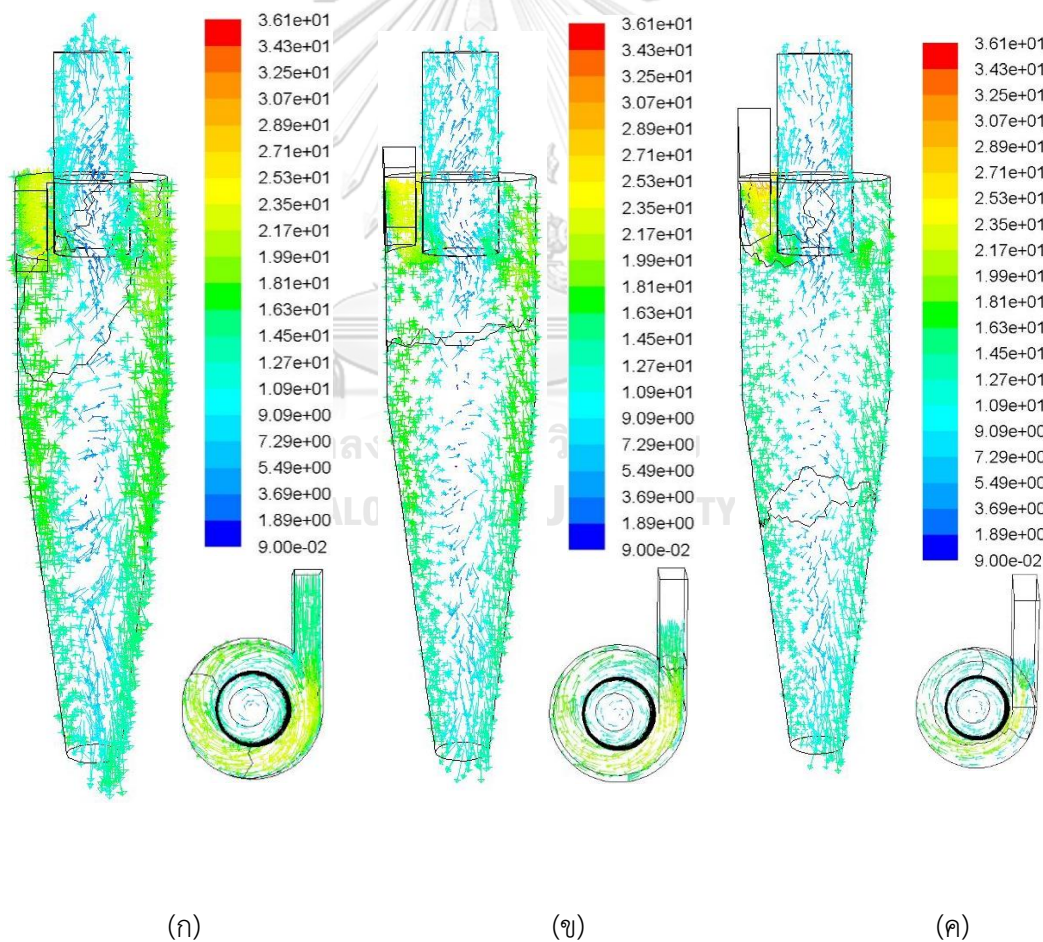


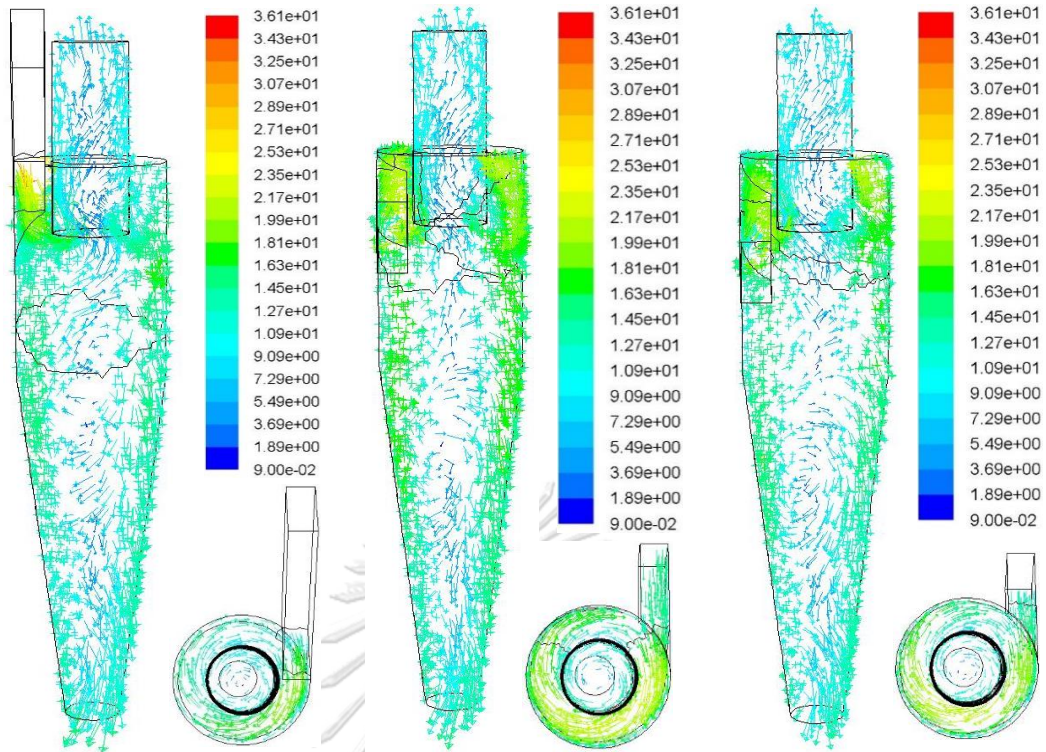
รูปที่ 4.20 คอนทัวร์ความดันสถิต (static pressure) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz

- (ก) ไซโคลนสเตมมาน (Stairmand high efficiency cyclone หรือ cyclone I)
- (ข) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา (cyclone_in15)
- (ค) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา (cyclone_in30)
- (ง) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา (cyclone_in45)
- (จ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา (cyclone_in_mi15)
- (ฉ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา (cyclone_in_mi30)
- (ช) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา (cyclone_in_mi45)
- (ซ) ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_inVF10%) และ
- (ณ) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

4.2.2.5 เวกเตอร์ของความเร็วในไซโคลน (velocity vectors)

เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการไหลของของไหลในไซโคลนสามารถศึกษาจากเวกเตอร์ของความเร็ว (velocity vectors) เป็นการแสดงให้เห็นถึงทิศทางของการไหลที่เกิดขึ้นรวมถึงความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ในไซโคลนด้วย ซึ่งจะไม่สามารถมองเห็นจากการทดลอง หรือการใช้งานจริง ลักษณะของความเร็วภายในไซโคลนเกิดจากแรงเหวี่ยง ทำให้เกิดการไหลวนของของไหล จากรูปที่ 4.21 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วในหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s) ของไซโคลนทุกรูปร่าง พบว่าที่บริเวณทางเข้าไซโคลน (inlet velocity) จะมีความเร็วสูง และที่บริเวณแกนกลาง (central region) ของไซโคลน จะสังเกตเห็นการไหลย้อนกลับของความเร็วสู่ด้านบนของไซโคลน ที่บริเวณทางออกของแก๊ส (vortex finder) พบว่ามีการไหลย้อนทางกันซึ่งเป็นผลให้เกิด short-circuiting flow จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคลดลง

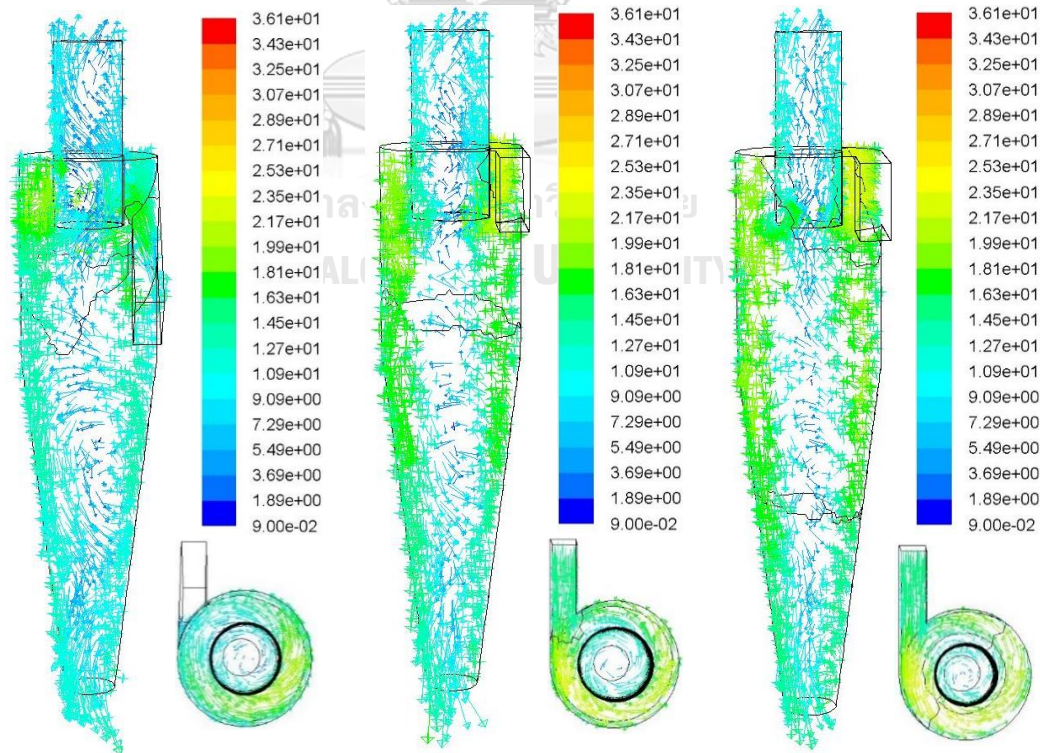




(ง)

(จ)

(ฉ)



(จ)

(ช)

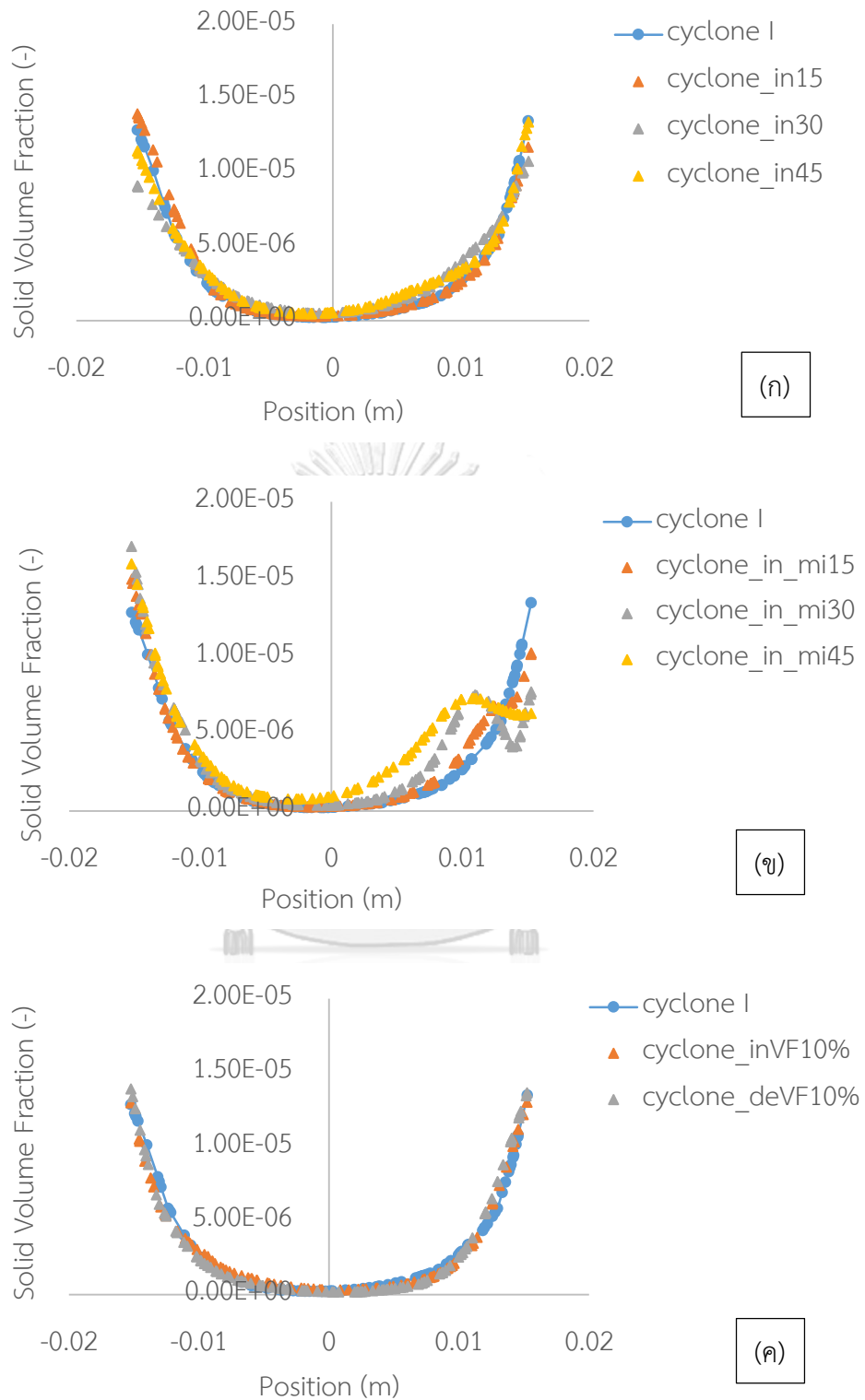
(ฉ)

รูปที่ 4.21 เวกเตอร์ของความเร็วในไซโคลน (velocity vectors) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz

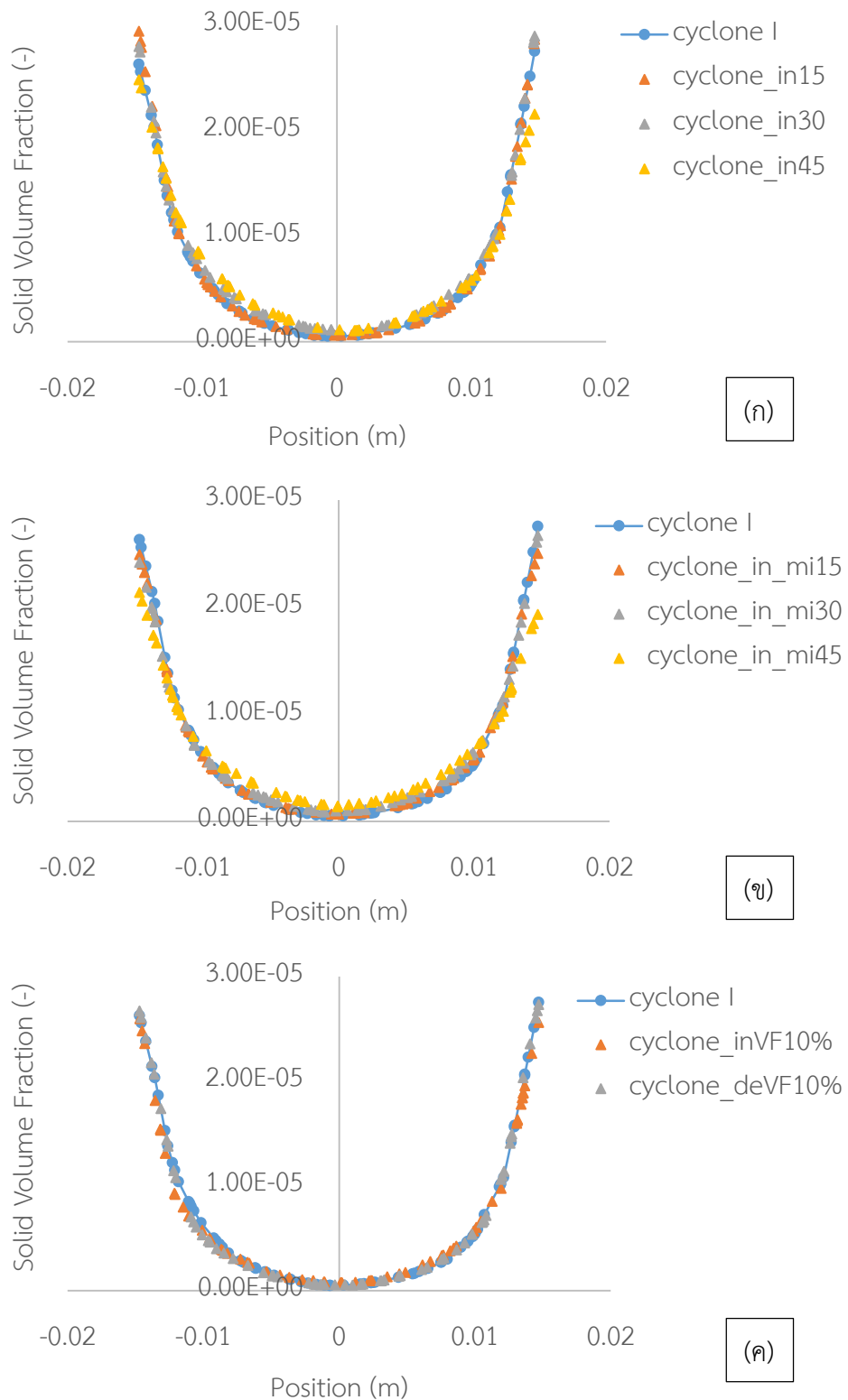
- (ก) ไซโคลนสแตมมาน (Stairmand high efficiency cyclone หรือ cyclone I)
- (ข) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา (cyclone_in15)
- (ค) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา (cyclone_in30)
- (ง) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา (cyclone_in45)
- (จ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา (cyclone_in_mi15)
- (ฉ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา (cyclone_in_mi30)
- (ช) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา (cyclone_in_mi45)
- (ซ) ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_inVF10%) และ
- (ฅ) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

4.2.2.6 สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (solid volume fraction)

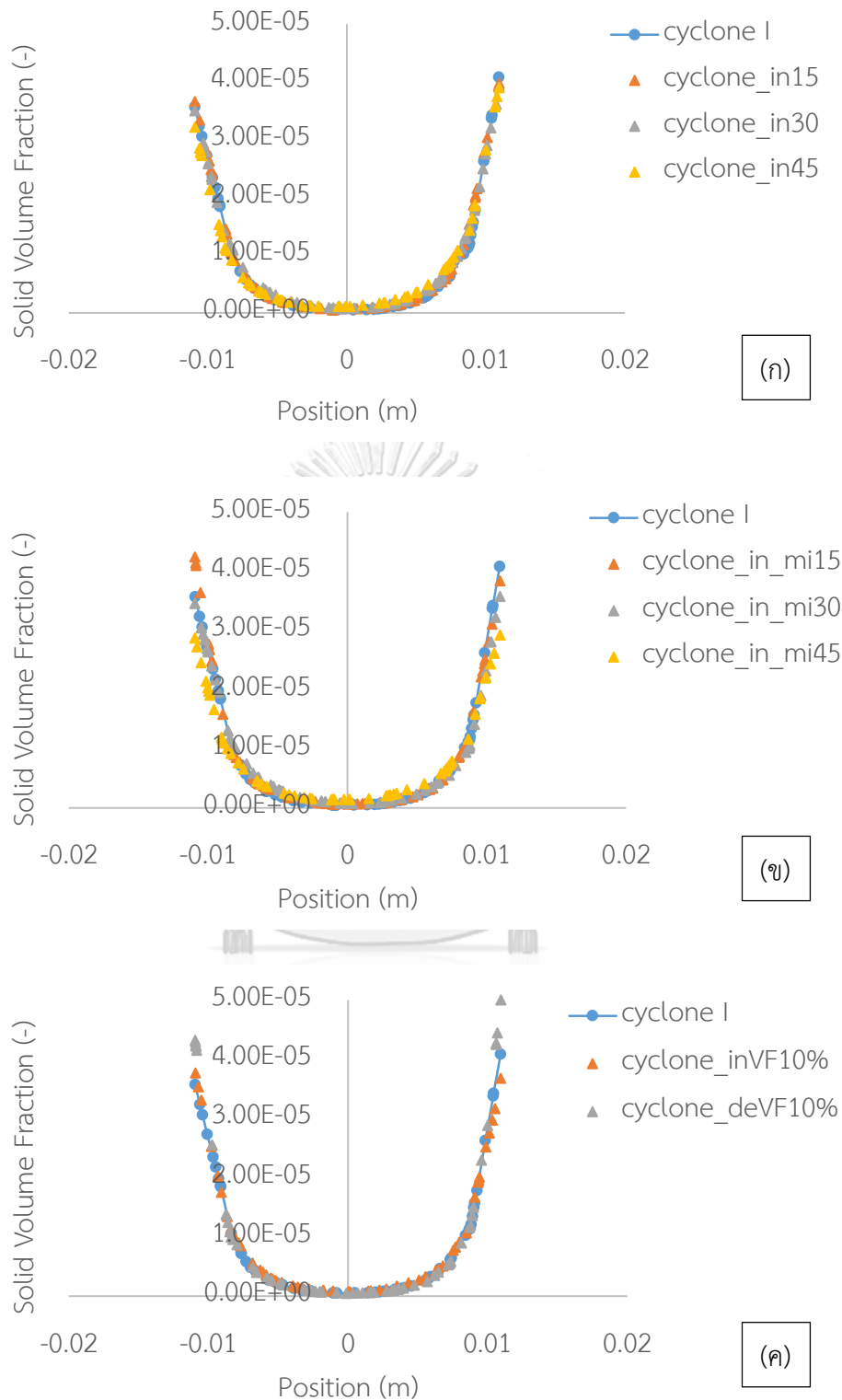
สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง สามารถอธิบายการกระจายตัวของของแข็ง ทิศทาง รวมถึงปริมาณของของแข็งที่เกิดขึ้นในไซโคลนที่ตำแหน่งต่างๆ รูปที่ 4.22 4.23 และ 4.24 แสดงกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งของไซโคลนสแตมมาน หรือไซโคลนขนาดเล็ก (cyclone I) กับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลงและเพิ่มขึ้น 10% จากไซโคลนสแตมมานขนาดเล็ก (cyclone I) ที่ตำแหน่ง $z=0.02$ 0.05 และ 0.08 เมตร ตามลำดับ จากรูปพบว่า การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งมีรูปแบบคล้ายตัว “U” ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณผนังของไซโคลนจะมีสัดส่วนปริมาตรของของแข็งอยู่มากเนื่องจากแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนและค่อยๆ ลดลงจนเกือบเป็น 0 ที่บริเวณแกนกลาง (core region) ของไซโคลนโดยมีทิศทางเคลื่อนที่ลงสู่ทางออกด้านล่างของไซโคลน (dust outlet) จากรูปที่ 4.22(ข) พบว่าที่ระหว่างตำแหน่ง $0.01-0.02$ เมตร ของไซโคลน 3 รูปแบบกราฟมีลักษณะงอเนื่องมาจากมุมของทางเข้าที่เป็นมุมลดส่งผลให้อนุภาคชนกับผนังด้านบนไซโคลนและเกิดการกระจาย รูปที่ 4.25 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งของไซโคลนรูปแบบต่างๆ จากรูปพบว่าบริเวณผนังของไซโคลนจะมีอนุภาคของแข็งอยู่มากและจะค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมีสู่แกนกลางไซโคลน ซึ่งประสิทธิภาพของไซโคลนสามารถดูได้จากสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในระบบ คือการที่ของแข็งหมุนวนในไซโคลนได้นาน ยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.22 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.02$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

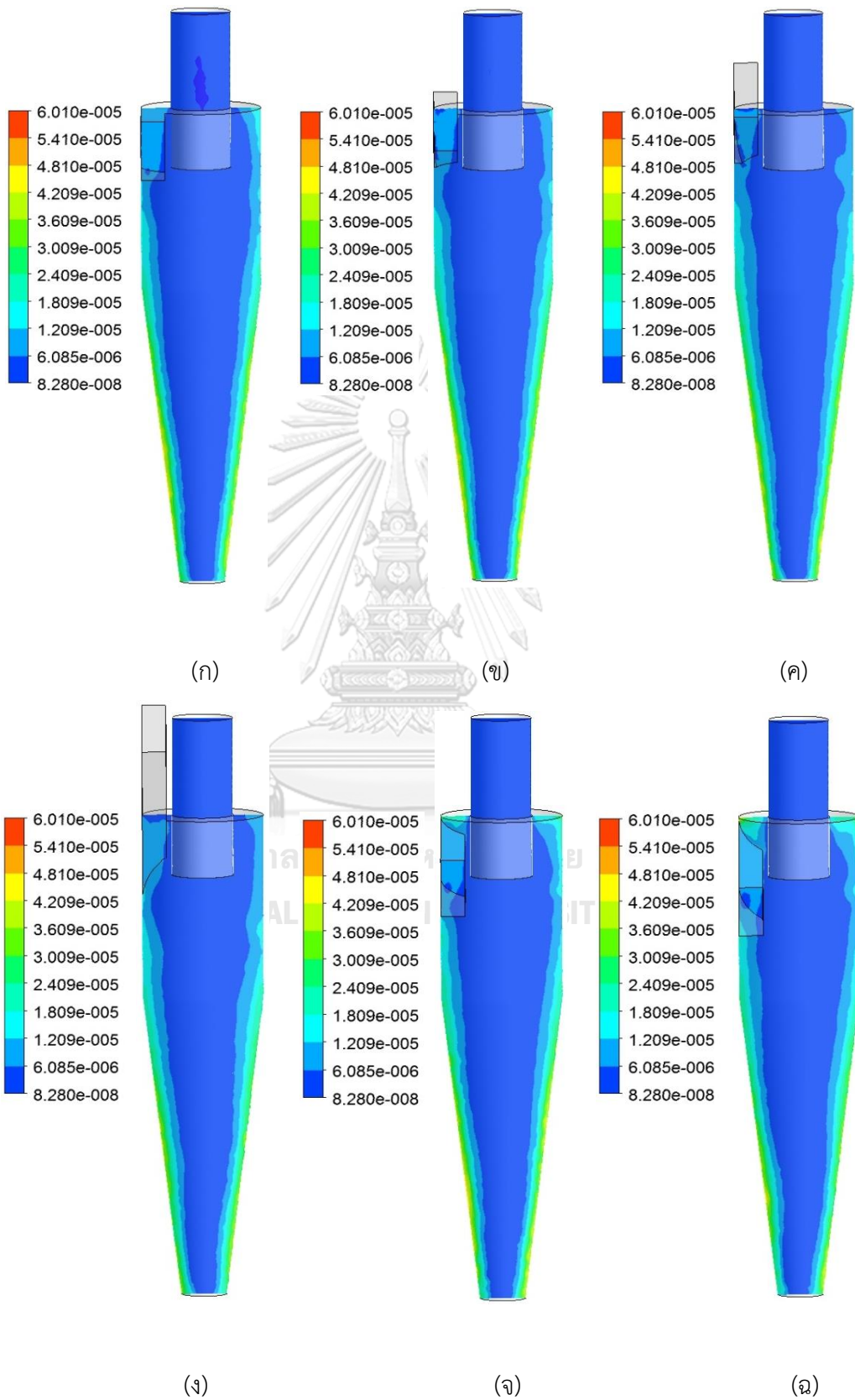


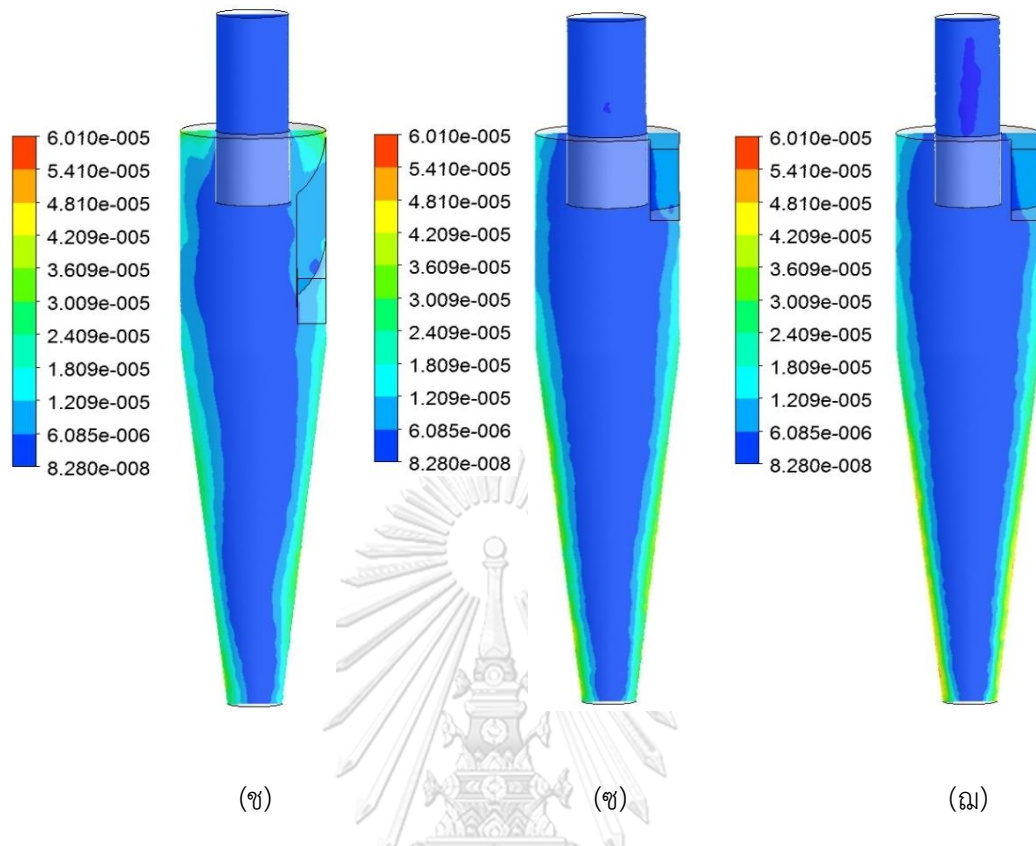
รูปที่ 4.23 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.05$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%



รูปที่ 4.24 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของไซโคลนสแตมาน ที่ $z=0.08$ เทียบกับ (ก) ไซโคลนที่ปรับมุมของทางเข้าขึ้น 15 30 และ 45 องศา (ข) ไซโคลนที่มุมทางเข้าลดลง 15 30 และ 45 องศา และ (ค) ไซโคลนที่ปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของแก๊สลดลง และเพิ่มขึ้น 10%

คอนทัวร์สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (contour of solid volume fraction)





รูปที่ 4.25 คอนทัวร์สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (solid volume fraction) ของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x=0$ บนหน้าตัด yz

- (ก) ไซโคลนสเตมาน (Stairmand high efficiency cyclone หรือ cyclone I)
- (ข) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 15 องศา (cyclone_in15)
- (ค) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 30 องศา (cyclone_in30)
- (ง) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าเพิ่ม 45 องศา (cyclone_in45)
- (จ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 15 องศา (cyclone_in_mi15)
- (ฉ) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 30 องศา (cyclone_in_mi30)
- (ช) ไซโคลนที่มุมของทางเข้าลดลง 45 องศา (cyclone_in_mi45)
- (ซ) ไซโคลนที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_inVF10%) และ
- (ณ) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

4.2.2.7 ผลของความดันลด (pressure drop) และประสิทธิภาพในการแยก (collection efficiency) ของไซโคลนสแตมาน (cyclone I) และไซโคลนรูปร่างต่างๆ

ความดันลด (pressure drop) เป็นค่าที่บอกถึงการใช้พลังงานที่จะแยกอนุภาคสำหรับไซโคลน ซึ่งถ้าความดันลดมีค่ามากขึ้นหมายความว่าต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับพลังงานในการดำเนินการเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่สำหรับการแยกอนุภาคของแข็งของไซโคลนถ้าความดันลดมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค (collection efficiency) เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้นเป็นผลจากการที่มีปริมาณของของแข็งในระบบมากซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนของอนุภาคของแข็งในไซโคลนเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้เกิดจำนวนรอบในการหมุนวนมากขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคดีขึ้น [6] โดยการพิจารณาผลของความดันลดสำหรับงานวิจัยนี้จะคำนวณจากผลต่างระหว่างความดันขาเข้า (inlet pressure) กับค่าเฉลี่ยของความดันขาออกทางด้านล่างและทางออกของแก๊สด้านบน (pressure across the outlet) [9] ผลต่างระหว่างความดันขาเข้า กับทางออกด้านบน (top outlet pressure, vortex finder) และทางออกด้านล่าง (bottom outlet pressure, dust outlet) ค่าความดันลดของไซโคลนสแตมาน (cyclone I) และไซโคลนในรูปร่างต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าไซโคลนสแตมาน (cyclone I) มีค่าความดันลดเท่ากับ 476.16 456.80 และ 495.52 ปาสคัล ที่คิดจากค่าเฉลี่ยทางออกด้านบนและทางออกด้านล่าง ทางออกด้านบน และทางออกด้านล่าง ตามลำดับ และมีไซโคลนเพียงรูปร่างเดียวที่ให้ผลความดันลดสูงกว่า คือไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%) มีค่าเท่ากับ 507.56 492.75 และ 522.38 ปาสคัล ที่คิดจากค่าเฉลี่ยทางออกด้านบนและทางออกด้านล่าง ทางออกด้านบน และทางออกด้านล่าง ตามลำดับ จะเห็นว่าความดันลดของไซโคลนทุกรูปร่างมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะคิดความดันลดเทียบกับตำแหน่งใดๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าของความดันลด และ ประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลนสแตมานและไซโคลนรูปร่างต่างๆ

	Pressure drop (Pa) Averaged outlet	Pressure drop (Pa) Top outlet	Pressure drop (Pa) Bottom outlet	Collection efficiency
Cyclone I	476.16	456.80	495.52	96.13%

	Pressure drop (Pa) Averaged outlet	Pressure drop (Pa) Top outlet	Pressure drop (Pa) Bottom outlet	Collection efficiency
Cyclone_in15	441.36	419.39	464.12	95.89%
Cyclone_in30	377.32	355.49	399.15	93.12%
Cyclone_in45	327.08	306.12	349.09	91.94%
Cyclone_in_mi15	432.35	408.67	456.86	95.20%
Cyclone_in_mi30	377.16	358.17	396.16	92.59%
Cyclone_in_mi45	283.84	267.36	300.88	84.77%
Cyclone_inVF10%	432.35	408.25	456.44	94.60%
Cyclone_deVF10%	507.56	492.75	522.38	97.52%

หมายเหตุ: ความเร็วทางเข้าไซโคลนทุกรูปทรง เท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที
ขนาดของอนุภาคของแข็ง เท่ากับ 1.5 ไมโครเมตร

ประสิทธิภาพในการแยก (collection efficiency) เป็นค่าที่แสดงถึงสมรรถนะของไซโคลนที่สามารถแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊สได้ ตารางที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไซโคลนสแตมาน และไซโคลนในรูปร่างต่างๆ พบว่าไซโคลนสแตมาน (cyclone I) มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคคิดเป็น 96.13% โดยที่ไซโคลนในรูปร่างต่างๆ มีเปอร์เซ็นต์ในการแยกอนุภาคน้อยกว่าไซโคลนสแตมาน (cyclone I) ยกเว้น ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%) มีประสิทธิภาพในการแยกสูงกว่าไซโคลนสแตมานที่ 97.52% ซึ่งสอดคล้องกับผลของความดันลดที่มีค่าสูงกว่าความดันลดของไซโคลนสแตมานเช่นกัน นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการแยกแล้ว ยังมีค่าของอนุภาคตัด (cut-off size, d_{50}) ที่บอกถึงสมรรถนะของไซโคลนได้อีกด้วย สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลนจะพิจารณาจากปริมาณของอนุภาคของของแข็งที่ทางออกด้านล่างด้วยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้ามาในไซโคลน ในทางตรงกันข้ามการหาอนุภาคตัดจะพิจารณาที่ทางออกของแก๊สด้านบนว่ามีขนาดของอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกไปทางออกของแก๊สด้านบนด้วยประสิทธิภาพ 50% ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดอนุภาคตัดใน

หน่วยไมโครเมตร (μm) ของไซโคลนสแตมาน (cyclone I) และไซโคลนที่ให้ค่าความดันลด และประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูงกว่า คือ ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%) ผลได้ที่ยังสอดคล้องกับผลของความดันลด และประสิทธิภาพในการแยก คือ ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%) มีขนาดอนุภาคตัด (cut-off size, d_{50}) เท่ากับ 0.30 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าของไซโคลนสแตมานที่มีขนาดอนุภาคตัดที่ 0.32 ไมโครเมตร (μm) กล่าวคืออนุภาคของแข็งที่จะหลุดออกไปยังทางออกของแก๊สทางด้านบน (vortex finder) มีขนาดเล็กมากๆ นั้นหมายความว่า เป็นไซโคลนให้ประสิทธิภาพในการอนุภาคได้

ตารางที่ 4.2 ค่าของอนุภาคตัด (cut-off size, d_{50}) ของไซโคลนสแตมาน (cyclone I) และไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%)

	Cut-off size (μm)
Cyclone I	0.32
Cyclone_deVF10%	0.30

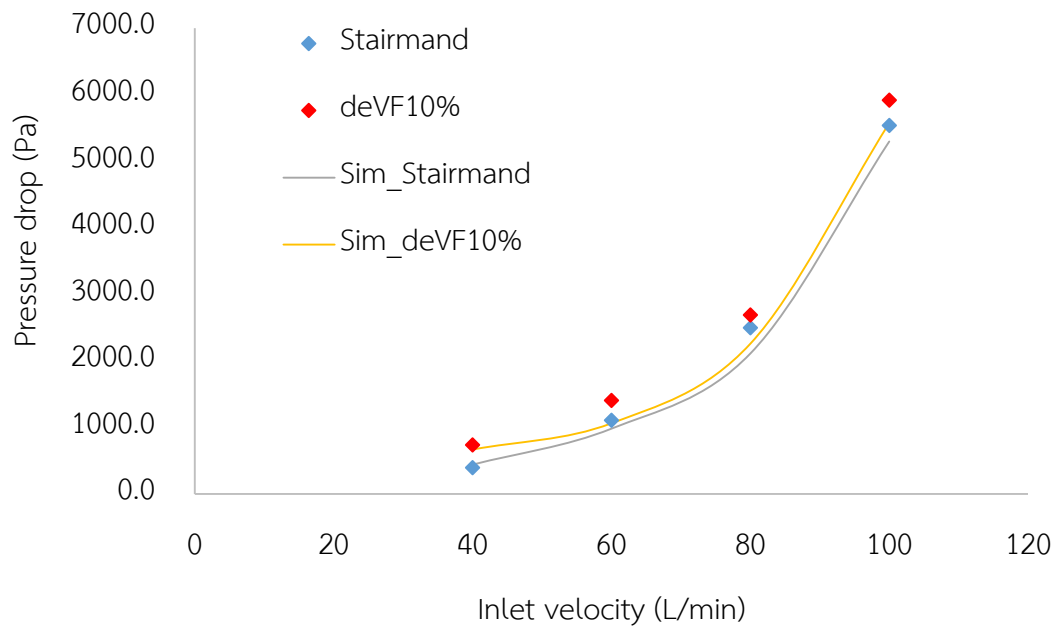
4.3 การศึกษาผลการทดลองด้วยไซโคลนต้นแบบสามมิติ และเทียบผลกับการจำลองกระบวนการ (simulation) ของไซโคลนสแตมาน

งานวิจัยส่วนที่สามารถศึกษาผลการทดลองจากการสร้างไซโคลนต้นแบบด้วยการพิมพ์สามมิติ โดยเปรียบเทียบผลของความดันลด (pressure drop) ที่ความเร็วเข้าเท่ากับ 40 60 80 และ 100 ลิตรต่อวินาที กับผลจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (simulation) ในงานวิจัยส่วนที่หนึ่ง ซึ่งไซโคลนที่เลือกมาทำการทดลองมี 2 รูปร่าง คือ ไซโคลนสแตมาน (cyclone I) และไซโคลนที่มีความดันลดและประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคจากการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่สูงกว่าไซโคลนมาตรฐาน คือ ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deVF10%) ผลจากการพิมพ์ไซโคลนต้นแบบด้วยการพิมพ์สามมิติของไซโคลนทั้ง 2 รูปร่างแสดงดังรูปที่ 4.26 ผลจากการทดลองและการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากรูปที่ 4.27 พบว่าผลของความดันลด (pressure drop) ของการจำลองกระบวนการและการทดลองของไซโคลนทั้ง 2 รูปแบบมีความสอดคล้องกัน คือ เมื่อป้อนความเร็วทางเข้าเท่ากับ 40 60 80 และ 100 ลิตรต่อ

นาที่ ตามลำดับ ส่งผลให้ความดันลดของไซโคลนสแตมานจากการจำลองมีค่าเท่ากับ 440.14 981.49 2110.49 และ 5297.3 ปาสคัล ตามลำดับ และค่าความดันลดจากการทดลองเท่ากับ 395.4 1107.3 2497.8 และ 5539.6 ปาสคัล ตามลำดับ สำหรับค่าความดันลดจากการจำลองกระบวนการของไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% มีค่าเท่ากับ 666.95 1062.26 2257.96 และ 5574.26 ปาสคัล ตามลำดับ ค่าความดันลดจากการทดลองเท่ากับ 737 1406.2 2688.1 และ 5915.7 ปาสคัล ตามลำดับ ความแตกต่างของความดันลดระหว่างผลจากการจำลองและจากการทดลอง น่าจะเป็นผลจากพื้นผิวของไซโคลนที่พิมพ์สามมิติด้วยพลาสติก ABS ซึ่งอาจจะยังให้พื้นผิวไม่เรียบเท่าที่ควร จากผลข้างต้นพบว่าเมื่อความเร็วป้อนเข้าสูงขึ้นจะส่งผลให้ความดันลดในระบบสูงขึ้น และไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% ให้ผลความดันลดสูงกว่าไซโคลนมาตรฐาน ทั้งจากการทดลองและการจำลองกระบวนการ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และผลจากการทำการทดลองของไซโคลนต้นแบบด้วยการพิมพ์สามมิติ แสดงให้เห็นว่าไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% (cyclone_deV10%) นั้น เหมาะต่อการพัฒนาให้สามารถใช้งานได้จริง และการใช้ผลิตภัณฑ์จากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ สามารถนำมาทดสอบพฤติกรรมต่างๆ สามารถออกแบบ และปรับเปลี่ยนรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย ซึ่งเป็น การช่วยลดต้นทุนสำหรับสร้างอุปกรณ์จริงเพื่อทำการทดลอง



รูปที่ 4.26 ไซโคลนต้นแบบจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (ซ้าย) ไซโคลนสแตมาน (ขวา) ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10%



รูปที่ 4.27 ผลการทดลองเทียบกับผลจากการจำลองของความดันลด (pressure drop) ที่ความเร็วทางเข้าต่างๆ (L/min)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งการศึกษาเพื่อหาแบบจำลองและภาวะที่เหมาะสมสำหรับไซโคลนสแตมาน (Stairmand cyclone) ในระบบสามมิติสำหรับการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) โดยเทียบกับผลของความดันลด (pressure drop) จากการทดลองของ Azadi และคณะ [9] ส่วนที่สองศึกษาผลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ โดยใช้โมเดลและภาวะเดียวกับที่ศึกษาจากส่วนที่หนึ่ง ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และส่วนที่สาม การศึกษาผลของความดันลด (pressure drop) จากสร้างไซโคลนต้นแบบด้วยการพิมพ์สามมิติ ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบผลของไซโคลนต้นแบบกับผลจากการจำลองกระบวนการ (simulation) และไซโคลนที่ให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค (collection efficiency) ดีกว่าไซโคลนสแตมาน

5.1.1 การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองและภาวะที่เหมาะสมสำหรับไซโคลนสแตมาน (Stairmand cyclone) ในระบบสามมิติสำหรับการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD)

การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองและภาวะที่เหมาะสมในการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยเปรียบเทียบผลกับการทดลองของ Azadi และคณะ [9] แบบจำลองที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ RNG k- ϵ เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำสำหรับรูปแบบการไหลหมุนวน (rotating flow) ของอากาศ ซึ่งเหมาะกับการศึกษาการไหลภายในไซโคลน ซึ่งการจำลองกระบวนการจะสมมติค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (volume fraction) เพื่อให้ความดันลด (pressure drop) ที่ความเร็วทางเข้าเท่ากับ 5 10 15 20 และ 25 เมตรต่อวินาที ของไซโคลน 2 ขนาดคือ Cyclone I และ Cyclone II สอดคล้องกับการทดลอง โดยต้องจำลองกระบวนการทั้งหมด 66 เคส ผลจากการจำลองได้ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเท่ากับ 0.000006 สำหรับ Cyclone I และ 0.0006 สำหรับ Cyclone II โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดคิดเป็น 23.79% และ 10.57% ตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาผลของไซโคลนรูปร่างต่างๆ จากการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การศึกษามรรณะของไซโคลนรูปร่างต่างๆ ด้วยการพิจารณาจากความดันลด (pressure drop) ประสิทธิภาพในการแยก (collection efficiency) และขนาดอนุภาคตัด (cut-off size) โดยมีไซโคลนสแตมานเป็นไซโคลนมาตรฐานในการปรับรูปร่างที่สนใจ ดังนั้นคือ การปรับมุมของทางเข้าของแก๊ส (inlet of angle) โดยปรับมุมขึ้นสามแบบคือ 15 30 45 องศา ปรับมุมลดสามแบบคือ 15 30 45 องศา และปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของแก๊ส (diameter of vortex finder) โดยเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของแก๊ส 10% เทียบกับขนาดของไซโคลนสแตมาน และลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของแก๊ส 10% ทั้งหมด 8 รูปร่าง เมื่อจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแล้วพบว่า ไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% ให้ผลความดันลด และประสิทธิภาพในการแยกสูงกว่าไซโคลนสแตมาน โดยความดันลดสูงกว่า 31.4 ปาสคัล มีประสิทธิภาพในการแยกสูงกว่า 1.4% และมีขนาดอนุภาคตัดสูงกว่า 0.02 ไมโครเมตร ซึ่งผลทางอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamics) ทั้งความเร็วในรูปแบบต่างๆ ทิศทาง พฤติกรรมการไหลในไซโคลน ความดันสถิต (static pressure) และสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (solid volume fraction) สอดคล้องกัน

5.1.3 การศึกษาผลจากการทดลองเทียบกับผลจากการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การศึกษามรรณะการทดลองด้วยไซโคลนต้นแบบด้วยการพิมพ์สามมิติเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองกระบวนการโดยจะพิจารณาจากไซโคลน 2 รูปร่าง คือ ไซโคลนมาตรฐาน (Cyclone I) และไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% โดยเทียบผลความดันลด (pressure drop) ที่ความเร็วทางเข้าต่างๆ พบว่าผลจากการทดลองและผลจากการจำลองกระบวนการด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ให้ค่าความดันลดใกล้เคียงกัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดจากการทดลองและการจำลองกระบวนการสำหรับไซโคลนมาตรฐาน (cyclone I) เท่ากับ 15.5% ที่ความเร็วทางเข้าเท่ากับ 80 ลิตรต่อนาที และไซโคลนที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส 10% มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 24.45% ที่ความเร็วทางเข้าเท่ากับ 60 ลิตรต่อนาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการจำลองกระบวนการของไซโคลนในรูปร่างต่างๆ ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และทำการทดลองไซโคลนด้วยไซโคลนต้นแบบจากการพิมพ์สามมิติ ซึ่งจากการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการศึกษาขนาดอนุภาคตัด (cut off size) เพื่อให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นควรจำลองกระบวนการด้วยการกำหนดขนาดอนุภาคของแข็งเป็นช่วง (particle range) เพราะการใช้งานจริงอนุภาคของแข็งมีหลายขนาดไม่สามารถกำหนดได้ และสำหรับการทดลองด้วยไซโคลนต้นแบบสามมิติเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นเมื่อเทียบกับผลการจำลอง อาจเนื่องจากพลาสติกที่ใช้สร้างไซโคลนชิ้นมานั้นยังไม่สามารถทำให้ผิวด้านในเรียบเนียนได้เท่าที่ควร ดังนั้นหากมีการปรับปรุงพัฒนาพลาสติกให้มีความเหมาะสมกับงานมากขึ้น ก็จะส่งผลให้ผลการทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น

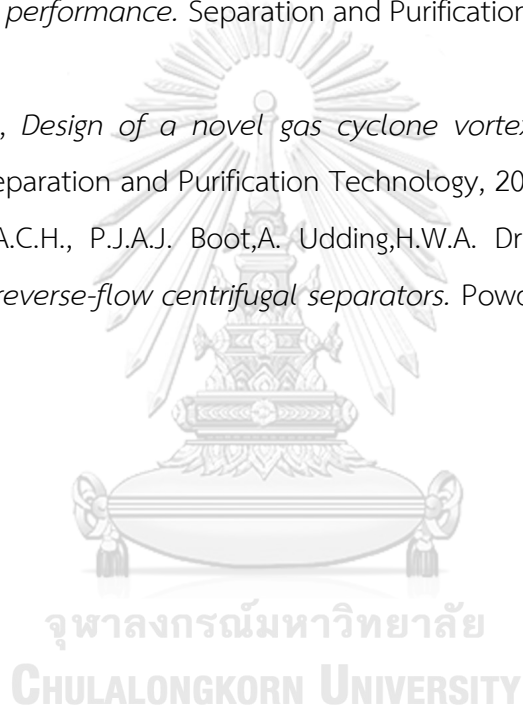


รายการอ้างอิง

1. การพิมพ์ 3 มิติคืออะไร? ; Available from: <https://x3dtechnology.com/blogs/3d-printing-101/what-is-3d-printing>.
2. Lee, J.W., H.J. Yang, and D.Y. Lee, *Effect of the cylinder shape of a long-coned cyclone on the stable flow-field establishment*. Powder Technology, 2006. **165**(1): p. 30-38.
3. เชี่ยวชาญ, ป., อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดอนุภาค. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช: กรุงเทพฯ. p. 28-38.
4. Brar, L.S., R.P. Sharma, and K. Elsayed, *The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone*. Powder Technology, 2015. **286**: p. 668-677.
5. de Souza, F.J., R.d.V. Salvo, and D.d.M. Martins, *Effects of the gas outlet duct length and shape on the performance of cyclone separators*. Separation and Purification Technology, 2015. **142**: p. 90-100.
6. Misiulia, D., A.G. Andersson, and T.S. Lundström, *Effects of the inlet angle on the flow pattern and pressure drop of a cyclone with helical-roof inlet*. Chemical Engineering Research and Design, 2015. **102**: p. 307-321.
7. Shukla, S.K., P. Shukla, and P. Ghosh, *The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators*. Applied Mathematical Modelling, 2013. **37**(8): p. 5774-5789.
8. Karagoz, I. and F. Kaya, *CFD investigation of the flow and heat transfer characteristics in a tangential inlet cyclone*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007. **34**(9-10): p. 1119-1126.
9. Azadi, M., M. Azadi, and A. Mohebbi, *A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters*. J Hazard Mater, 2010. **182**(1-3): p. 835-41.
10. Wang, B., et al., *Computational study of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones: Effect of body dimensions*. Minerals Engineering, 2011. **24**(1): p. 19-34.

11. Gimnun, J., et al., *The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2005. **44**(1): p. 7-12.
12. Chalermssinsuwan, B., D. Gidaspow, and P. Piumsomboon, *Two- and three-dimensional CFD modeling of Geldart A particles in a thin bubbling fluidized bed: Comparison of turbulence and dispersion coefficients*. Chemical Engineering Journal, 2011. **171**(1): p. 301-313.
13. Samruamphianskun, T., P. Piumsomboon, and B. Chalermssinsuwan, *Computation of system turbulences and dispersion coefficients in circulating fluidized bed downer using CFD simulation*. Chemical Engineering Research and Design, 2012. **90**(12): p. 2164-2178.
14. Bernardo, S., et al., *3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles*. Powder Technology, 2006. **162**(3): p. 190-200.
15. Goole, J. and K. Amighi, *3D printing in pharmaceuticals: A new tool for designing customized drug delivery systems*. Int J Pharm, 2016. **499**(1-2): p. 376-394.
16. Lee, J.-Y., et al., *The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology*. Journal of Membrane Science, 2016. **499**: p. 480-490.
17. Dirgo, J. and D. Leith, *Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions*. Aerosol Science and Technology, 2007. **4**(4): p. 401-415.
18. Guan Heng Yeoh, J.T., *Computational Techniques for Multi-Phase Flows : Basics and Applications*. 1 st ed. 2010, USA: Elsevier Ltd.
19. Tryggvason, G., *Computational Fluid Dynamics*. 2016: p. 227-291.
20. เดชะอำไพ, ป., พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ: ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ ไฟไนต์วอลุ่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3 ed. 2016: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. Shin, M.-S., et al., *A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments*. Applied Thermal Engineering, 2005. **25**(11-12): p. 1821-1835.

22. Jonathan, G. and A. Karim, *3D printing in pharmaceuticals: A new tool for designing customized drug delivery systems*. Int J Pharm, 2016. **499**(1-2): p. 376-94.
23. Barnatt, C., การพิมพ์ 3 มิติ เทคโนโลยีเปลี่ยนโลก *3D PRINTING*. Second ed. 2015: Q I I S Co., Ltd.
24. Wang, B., et al., *Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator*. Applied Mathematical Modelling, 2006. **30**(11): p. 1326-1342.
25. Zhou, F., et al., *Experimental and CFD study on the effects of surface roughness on cyclone performance*. Separation and Purification Technology, 2018. **193**: p. 175-183.
26. Elsayed, K., *Design of a novel gas cyclone vortex finder using the adjoint method*. Separation and Purification Technology, 2015. **142**: p. 274-286.
27. Peng W., A.C.H., P.J.A.J. Boot,A. Udding,H.W.A. Dries,A. Ekker,J. Kater, *Flow pattern in reverse-flow centrifugal separators*. Powder Technology, 2002. **127**: p. 212-222.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรวัดน์ จึงเจริญสุขยิ่ง เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2557 ได้มีผลงานทางด้านวิชาการดังนี้

1. The 23rd PPC and PETROMAT Symposium 2017- Topic "Effects of Cyclone Vortex Finder on Solid Separation Using Computational Fluid Dynamics Simulation" 23 May 2017, Pathumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand
2. International Conference 2017: Alternative Energy in Developing Counties and Emerging Economies (AEDCEE 2017) - Topic "Effects of cyclone vortex finder and inlet angle on solid separation using CFD simulation" 25-26 May 2017, Pullman Bangkok King Power Hotel, Bangkok, Thailand
3. International Journal - Topic "Effects of cyclone vortex finder and inlet angle on solid separation using CFD simulation" Energy Procedia 138 (2017), 1116-1121