

การศึกษาการดักจับอนุภาคแอโรซอลด้วยอุปกรณ์ชนิดไซโคลน-เส้นใยกรอง
Study of Aerosol Collection Using Filter-Equipped Cyclones

นเรศ เจริญขวัญ
Narate Charoenkwan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University
2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่	TH 7683.A3 นว 4 2554
Bib Key	351019
	13 ต.ค. 2554

พ. 2

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการดักจับอนุภาคแอโรซอลด้วยอุปกรณ์ชนิดไซโคลน-เส้นใยกรอง
ผู้เขียน	นายนเรศ เจริญขวัญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการไหลของกระแสอากาศภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยทำการติดตั้งเส้นใยกรอง 2 ชนิด บรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกไซโคลน คือ เส้นใยไฟเบอร์ (fibrous filter) และเส้นใยสแตนเลส (stainless steel) ซึ่งทำการติดตั้ง 2 แบบ คือ เส้นใยไฟเบอร์ ติดตั้งแบบเป็นกรวย 4 กรวย มีความยาวของกรวย 4 mm และ 8 mm ส่วนเส้นใยสแตนเลสบรรจุเต็มช่องว่างมีน้ำหนัก 0.94 g และ 1.83 g ทำการศึกษาสนามการไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคนขนาด 0.3, 0.5 และ 1 μm จากการจำลองพบว่า ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ และไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสเปลี่ยนรูปแบบการกระจายตัว การติดตั้งเส้นใยกรองภายในไซโคลนส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วในแนวสัมผัสลดลงและความเร็วในแนวแกนเพิ่มขึ้น ทำให้กลไกการดักจับด้วยเส้นใยกรองด้วยกลไกการแพร่ และการกระทบด้วยแรงเฉื่อยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยกรองมีค่าลดลง เพราะการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศมีระยะทางสั้นลงเมื่อเทียบกับไซโคลนเปล่า ซึ่งค่าความดันสูญเสียในไซโคลนเปล่า ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g ในงานวิจัยมีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดจากการทดลอง 17.6%, 57.6%, 77.9%, 39.6% และ 5.1% ตามลำดับ

Thesis Title Study of Aerosol Collection Using Filter-Equipped Cyclones
Author Mr. Narate Charoenkwan
Major Program Mechanical Engineering
Academic Year 2011

ABSTRACT

Air flow characteristics in filter-equipped cyclones was investigated by a Computational Fluid Dynamics (CFD) approach. A conventional cyclone dust collector was modified by adding two types of filter materials in a space between inner wall of the cyclone body and outer wall of the vortex finders. Four fins of fibrous filter sheets with 4-mm and 8-mm widths were attached along a surface of the vortex finder, while stainless steel fibers with two packing densities were placed to fill the space. Velocity and pressure fields as well as motion of 0.3, 0.5 and 1.0- μm particles were studied. Simulation results show that the tangential and axial velocity patterns in the filter-equipped cyclones are changed from those in the original cyclone. Collection efficiency enhancement of the filter-equipped cyclones is due to the reduction of tangential velocity and increase of axial velocity which result in an increase of diffusion and inertial impaction collection mechanisms in the filters. The pressure drop was found to be reduced because the pathlines in the filter-equipped cyclones are shorter. Maximum deviation of the pressure drop from experiment in an original cyclone, 4-mm and 8-mm fibrous filter-equipped cyclones, and 0.94 g and 1.83 g stainless steel filter-equipped cyclones were found to be 17.6%, 57.6%, 77.9%, 39.6% and 5.1% respectively.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลสำคัญหลายท่านด้วยกันจึงถือโอกาสนี้ขอขอบคุณบุคคลดังกล่าวคือ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงศ์ ที่มสกุล ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยรวมถึงการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคูสิต ดร.ฐานันครศักดิ์ เทพญา และรองศาสตราจารย์ ดร.มานะ อมรกิจบำรุง ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย และศูนย์กสิกรรมมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณความดีทั้งหมดจากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้แก่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การดูแลเลี้ยงดูเป็นอย่างดี ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้วิชาความรู้และปลูกฝังคุณธรรม และเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยเล่มนี้ จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในเนื้อหารายละเอียดต่าง ๆ เป็นอย่างดี และหากมีข้อผิดพลาด หรือมีข้อบกพร่องประการใดผู้วิจัยขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นเรศ เจริญขวัญ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	6
2. ทฤษฎี	7
2.1 ไชโคลอน	7
2.1.1 ส่วนประกอบของไชโคลอน	7
2.1.2 ขั้นตอนการทำงานของไชโคลอน	8
2.1.3 ลักษณะสมบัติทั่วไปของไชโคลอน	9
2.2 สมรรถนะของไชโคลอน	10
2.2.1 ขนาดตัด	10
2.2.2 ประสิทธิภาพของไชโคลอน	12
2.2.3 ความดันสูญเสีย	16
2.3 เส้นใยกรอง	22
2.3.1 กลไกในการดักจับอนุภาค	22
2.4 ลักษณะทั่วไปของการไหล	26
2.5 สมการเชิงอนุพันธ์มวล	27
2.6 สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม	27
2.7 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	28
2.8 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน	30
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$	30
2.8.2 แบบจำลอง Renormalization-group (RNG) $k - \epsilon$	31
2.8.3 แบบจำลอง Reynolds Stress Model (RSM)	32
2.9 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลน	33
2.10 สมการการไหลผ่านวัสดุพรุน	35
3. ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	37
3.1 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม	37
3.1.1 สมการควบคุมพื้นฐาน	37
3.1.2 การพา	38
3.1.3 การแพร่	39
3.1.4 แหล่งกำเนิด	40
3.2 การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว	41
3.3 การวางกริดแบบเยื้องกัน	44
3.4 กระบวนการหาคำตอบ	45
4. ระเบียบวิธีวิจัย	52
4.1 ขั้นตอนการวิจัย	52
4.2 การกำหนดกริดของไซโคลน	55
4.3 สมรรถนะเส้นใยกรอง	58
4.4 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำอากาศภายในไซโคลน	63
4.5 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำอากาศและอนุภาคภายในไซโคลน	63
4.6 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำอากาศภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง	65
4.7 การศึกษาการไหลของอนุภาคผ่านไซโคลน-เส้นใยกรอง	65
5. ผลการจำลองและการวิจารณ์ผลของไซโคลน	66
5.1 ผลของจำนวนกริดต่อความแม่นยำในการคำนวณ	66
5.2 ความดันสูญเสียและการกระจายความดันในไซโคลน	70
5.3 ผลคำนวณความเร็วในไซโคลน	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1 ผลการคำนวณความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน	73
5.3.2 ผลการจำลองความเร็วในแนวแกนในไซโคลน	75
5.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลนและประสิทธิภาพการคักจับอนุภาค	78
6. ผลการจำลองและการวิจารณ์ผลของไซโคลน-เส้นใยกรอง	81
6.1 ความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยกรอง	81
6.2 การกระจายความดันไซโคลน-เส้นใยกรอง	86
6.2.1 ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์	86
6.2.2 ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส	88
6.3 ความเร็วในไซโคลน-เส้นใยกรอง	90
6.3.1 ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์	90
6.3.2 ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส	99
6.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง	105
7. บทสรุป	113
7.1 สรุปผล	113
7.1.1 ไซโคลน	113
7.1.2 ไซโคลน-เส้นใยกรอง	114
7.2 ข้อเสนอแนะ	115
เอกสารอ้างอิง	116
ภาคผนวก	120
ก รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยกรอง	121
ข กราฟแสดงจำนวนของอนุภาคในไซโคลนในแต่ละเวลา	135
ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	148
ประวัติผู้เขียน	155

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบผลงานวิจัยการจำลองลักษณะการไหลของอากาศ	3
2.1 ค่า H_v ของแต่ละการศึกษา	17
4.1 ขนาดของไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย	57
4.2 ความหนาของเส้นใยกรองแต่ละแกนภายในไซโคลน	61
4.3 สัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลของเส้นใยไฟเบอร์	61
4.4 สัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลของเส้นใยสแตนเลส	62
4.4 เงื่อนไขขอบเขตของ Discrete Phase Model (DPM)	64
6.1 ระยะทางของกระแสน้ำอากาศที่เคลื่อนที่ภายในไซโคลนรูปแบบต่าง ๆ	84
6.2 ความเร็วเฉลี่ยในไซโคลนและเส้นใยกรอง	109
6.3 ค่า Stokes number และ Peclet number ที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s	110
6.4 ค่า Stokes number และ Peclet number ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	110
6.5 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ของเส้นใยเดี่ยวที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s	111
6.6 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ของเส้นใยเดี่ยวที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	111
6.7 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกกระทบด้วยแรงเฉื่อยของเส้นใยเดี่ยวที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s	111
6.7 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกกระทบด้วยแรงเฉื่อยของเส้นใยเดี่ยวที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	112

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะของไซโคลน (ก) รูปทรงทั่วไปของไซโคลน (ข) รูปตัดขวางและรูปตัดด้านบนที่ภายในมีการหมุนเวียนของลม	2
2.1 ลักษณะของไซโคลน	8
2.2 slip correction factors ของอนุภาค	11
2.3 รายละเอียดตัวแปรของไซโคลน	12
2.4 กระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในไซโคลน	20
2.5 ลักษณะที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านเส้นใยกรองเส้นเดียว	22
2.6 การดักจับอนุภาคของเส้นใยกรองเส้นเดียวโดยการสกัดกัน	24
2.7 การดักจับอนุภาคของเส้นใยกรองเส้นเดียวโดยการกระทบด้วยแรงเฉื่อย	25
2.8 การดักจับอนุภาคของเส้นใยกรองเส้นเดียวโดยการแพร่	26
2.9 การวัดความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน	29
3.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสองมิติ	39
3.2 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK	42
3.3 การเกิด checker-board ของความดัน	44
3.4 การวางกริดแบบเชื่อมกัน	45
3.5 สเตลาร์ปริมาตรควบคุมในการ discretized ของสมการต่อเนื่อง	48
3.6 ผังงานลำดับขั้นตอนการคำนวณแบบวิธี SIMPLE	51
4.1 ขั้นตอนการวิจัย	54
4.2 ขนาดไซโคลนของ Slack et al. [44]	56
4.3 แบบจำลองไซโคลน (ก) แบบจำลองที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ (ข) Slack et al. [44]	56
4.4 ขนาดและการติดตั้งเส้นใยกรองของไซโคลนในงานวิจัย Sangkhamanee et al. [4]	57
4.5 ชุดทดลองหาค่าความดันสูญเสียในการไหลของกระแสอากาศผ่านเส้นใยกรอง	59
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำ	59
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็ว	60
4.8 เงื่อนไขของผนังแต่ละส่วนและทางเข้าในการปล่อยอนุภาค	64
5.1 แสดงตำแหน่งความเร็ว (ก) ตำแหน่งที่นำผลมาเปรียบเทียบ (ข) โพรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัส (ค) โพรไฟล์ความเร็วในแนวแกน	67

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 โพรไฟล์ความเร็วตำแหน่ง 0.32 m. (ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน	69
5.3 โพรไฟล์ความเร็วตำแหน่ง 0.38 m (ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน	70
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถุณย์กับความเร็วที่จำนวนกริดต่าง ๆ	71
5.5 การเรียงตัวของกริดและคุณภาพของกริดในแบบจำลอง ไซโคลน	71
5.6 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	72
5.7 ตำแหน่งผลของความเร็วในไซโคลน	73
5.8 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	74
5.9 โพรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน	75
5.10 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	76
5.11 โพรไฟล์ความเร็วในแกนในไซโคลน	77
5.12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาด 1 μm ภายในไซโคลนที่เวลาต่าง ๆ	79
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดักจับกับขนาดอนุภาค (ก) ความเร็ว 13.27 m/s (ข) ความเร็ว 19.90 m/s	80
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถุณย์กับความเร็วในไซโคลนเส้นใยกรอง (ก) เส้นใยไฟเบอร์ (ข) เส้นใยสแตนเลส	83
6.2 การไหลของกระแสอากาศภายในไซโคลนและไซโคลนเส้น-ใยไฟเบอร์	84
6.3 การไหลของกระแสอากาศภายในไซโคลนและไซโคลนเส้น-ใยสแตนเลส	86
6.4 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm (ข) เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm	88
6.5 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยสแตนเลส 0.94 g (ข) เส้นใยสแตนเลส 1.83 g	90
6.6 ตำแหน่งผลของความเร็วในไซโคลน-เส้นใยกรอง	91
6.7 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	92

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 ภาพขยายตำแหน่ง a ของรูปที่ 6.7 (B-B')	93
6.9 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s	93
6.10 ภาพขยายตำแหน่ง a ของรูปที่ 6.9 (B-B')	94
6.11 โพรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m	95
6.12 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm (ข) เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm	97
6.13 โพรไฟล์ความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m	98
6.14 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยสแตนเลส 0.94 g (ข) เส้นใยสแตนเลส 1.83 g	100
6.15 โพรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m	102
6.16 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยสแตนเลส 0.94 g (ข) เส้นใยสแตนเลส 1.83 g	104
6.17 โพรไฟล์ความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ที่ความเร็ว 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m	105
6.18 จำนวนของอนุภาคในไซโคลนในแต่ละเวลา	106
6.19 โพรไฟล์ความเร็วในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ความเร็ว 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m (ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน	107

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

FDM	finite difference method
FEM	finite element method
FVM	finite volume method
DPM	Discrete Phase Model
RSM	Reynolds Stress Model
d_{50}	cutoff diameter
η	grade efficiency
η_i	fractional efficiency
λ	characteristic value
H_v	inlet velocity head
Ku	Kuwabara hydrodynamic factor
Stk	Stokes number
C_D	drag coefficient
Re_L	Reynolds number for flat plate
ρ	density
μ	viscosity
t	time
Δp	pressure drop
μ_t	turbulent viscosity
D_t	turbulent diffusivity
k	turbulent kinetic energy
ε	dissipation rate
G	production rate of turbulence
ϕ	scalar variable
Γ	diffusion coefficient
σ_ε	Prandtl/Schmidt number
$1/\alpha$	viscous resistance
C	inertial resistance

บทที่ 1

บทนำ

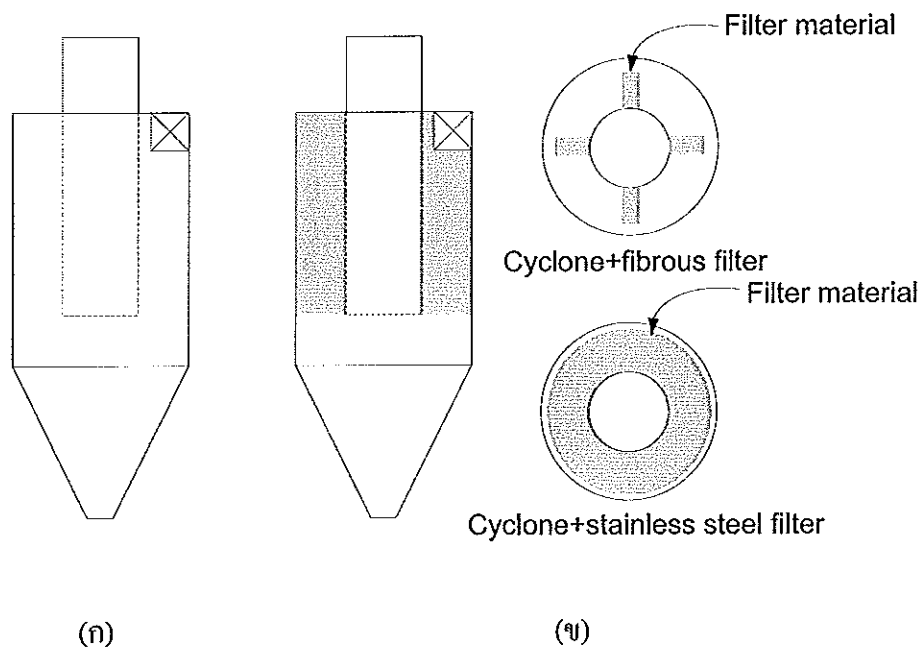
1.1 บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมในประเทศไทยมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากความเจริญก้าวหน้าทางอุตสาหกรรม และปัญหาจากฝุ่นละอองในอากาศก็ถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องได้รับการแก้ไข โดยส่วนใหญ่แล้วปัญหาจากฝุ่นละอองจะเกิดจากแหล่งอุตสาหกรรม และจากแหล่งธรรมชาติ โดยฝุ่นละอองขนาดใหญ่กว่า $10 \mu\text{m}$ จะทำให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจส่วนบน ส่วนฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า $10 \mu\text{m}$ สามารถเล็ดลอดผ่านเข้าไปถึงระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและถุงลมในปอดได้ [1] เป็นผลทำให้เกิดโรคทางเดินหายใจและโรคปอดต่าง ๆ โดยก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำลายเนื้อเยื่อของปอด ไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่มีกลไกง่าย ๆ ดังรูปที่ 1.1 (ก) ในการดักจับฝุ่นละอองขนาดใหญ่ออกจากกระแสอากาศ ซึ่งนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตไม้ โรงสี การผลิตซีเมนต์ หรืออุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมากมาย แต่ไซโคลนก็มีข้อจำกัดในการดักจับอนุภาคเล็ก คือถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า $10 \mu\text{m}$ ไซโคลนจะไม่สามารถดักจับอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้อนุภาคที่เล็กกว่า $10 \mu\text{m}$ สามารถปะปนมากับกระแสอากาศได้ จึงทำให้อากาศที่ออกมาจากไซโคลนนั้นไม่บริสุทธิ์ ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาดเล็กของไซโคลนได้มีความพยายามในการติดตั้งเส้นใยกรอง (fibrous filter) ภายในไซโคลน โดยเส้นใยกรองเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นหน้ากากที่ปกปิดใบหน้าที่ใช้ในการผ่าตัดทางการแพทย์ ผู้ทำความสะอาด และรวมถึงยังใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อกรองฝุ่นละออง ก่อนที่อากาศจะออกมาจากโรงงาน [2]

Namiki et al. [3] ได้พยายามเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลน โดยการติดตั้งแผ่นใยกรองในไซโคลนไว้ที่ผนังด้านในของท่อทางออก โดยศึกษาสมรรถนะการดักจับละอองน้ำมันของไซโคลนทั่วไป ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับไซโคลนที่มีการบุเส้นใย 2 ชนิด คือ ที่บุด้วยแผ่นกรองเส้นใยโพลีพรอพิลีน (polypropylene fabric) และบุด้วยแผ่นกรองเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (polyester fabric) พบว่าไซโคลนทั่ว ๆ ไปมีประสิทธิภาพการดักจับละอองน้ำมันรวม 43.0% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค $3.13 \mu\text{m}$ และความดันสูญเสีย (pressure drop) 550 Pa ไซโคลนที่มีการบุแผ่นกรองเส้นใยพอลิพรอพิลีน ที่มีความหนา 1 mm มีประสิทธิภาพการดักจับละอองน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 43.0% เป็น 50.9% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลงจาก

3.13 μm เป็น 2.86 μm และไซโคลนที่มีการบุแผ่นกรองเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่มีความหนา 2.5 mm มีประสิทธิภาพการดักจับละอองน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 76.9% ขนาดตัดลดลงเป็น 1.5 μm ความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็น 750 Pa

Sangkhamanee et al. [4] ได้ศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลน โดยทำการติดตั้งเส้นใยกรอง 2 ชนิด บรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกไซโคลน ดังรูปที่ 1.1 (ข) คือ เส้นใยไฟเบอร์ (fibrous filter) และ เส้นใยสแตนเลส (stainless steel) ซึ่งทำการติดตั้ง 2 แบบ คือ เส้นใยไฟเบอร์ ติดตั้งเป็นแบบครีป 4 ครีป มีความยาวของครีป 4 mm และ 8 mm ส่วนเส้นใยสแตนเลสบรรจุเต็มช่องว่างมีน้ำหนัก 0.94 g และ 1.83 g ศึกษาอนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ 1 μm พบว่าประสิทธิภาพการดักจับของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm เพิ่มขึ้นจากไซโคลนที่ไม่ได้ติดเส้นใยกรอง 20% ความดันสูญเสียลดลง 39.9% และ 48.9% ตามลำดับ ส่วนไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g ประสิทธิภาพการดักจับเพิ่มขึ้นจากไซโคลนที่ไม่ได้ติดเส้นใยกรอง 41% ความดันสูญเสียลดลง 30.6% และ 25.7% ความดันสูญเสียลดลงอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงกลไกดักจับอนุภาค ซึ่งยังขาดการศึกษาเชิงทฤษฎีและการจำลองเพื่อศึกษาการไหลของกระแสอากาศภายในอุปกรณ์ชนิดนี้



รูปที่ 1.1 ลักษณะของไซโคลน

(ก) รูปทรงทั่วไปของไซโคลน (ข) รูปตัดขวางและรูปตัดด้านบนที่มีการบุเส้นใยกรอง

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากลไกคักจับอนุภาคแอโรซอลด้วยอุปกรณ์ชนิดไซโคลน-เส้นใยกรอง โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [4] และอธิบายปรากฏการณ์ที่ทำให้ประสิทธิภาพการคักจับอนุภาคเพิ่มขึ้นและความดันสูญเสียลดลงในไซโคลน-เส้นใยกรอง ไซโคลนที่นำมาใช้เป็นต้นแบบนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีขนาดและรูปร่างตาม [4] ซึ่งการศึกษาด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายของอนุภาคแอโรซอลในการเพิ่มประสิทธิภาพการคักจับให้กับไซโคลนอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงจำเป็นในการทบทวนเอกสารเพื่อศึกษาวิธีการและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการไหล โดยรายละเอียดของแต่ละงานวิจัยที่ทำการทบทวนมีดังต่อไปนี้ ส่วนบทสรุปแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบผลงานวิจัยการจำลองลักษณะการไหลของอากาศ

ผู้ทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	CFD Software	model	ผู้ทำการศึกษาที่นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง
Gimbun et al. [5]	FLUENT	RNG $k-\varepsilon$, RSM	Dirgo [6], Shepherd & Lapple [7], Coker [8], Casal & Martinesz [9]
Chuah et al. [10]	FLUENT	RNG $k-\varepsilon$, RSM	Dirgo [6], Shepherd & Lapple [7], Coker [8], Casal & Martinesz [9]
Wan et al. [11]	FLUENT	RSM	Wan et al. [11]
วสันต์ [12]	FLUENT	RNG $k-\varepsilon$, Standard $k-\varepsilon$, RSM	วสันต์ [12]
กัมปนาท [13]	FLUENT	RNG $k-\varepsilon$, Standard $k-\varepsilon$, RSM	Dirgo & Leith [14], Yoshiday [15]
ทรงฤทธิ์ [16]	FLUENT	Standard $k-\varepsilon$, RSM	Imao et al. [17]

Gimbun et al. [5] ได้ทำการศึกษาขนาดทรงกรวยของไซโคลนที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะการเคลื่อนที่ในไซโคลน และลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศภายในไซโคลน โดยทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent model) ด้วยรูปแบบ Renormalization group (RNG $k-\epsilon$) กับ Reynolds Stress Model (RSM) ในไซโคลน 3 ขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงทรงกรวยของไซโคลน พบว่าการจำลองการไหลแบบ RSM ให้ผลของความดันสูญเสีย และประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเบี่ยงเบนจากผลการทดลองประมาณ 2.9%, 5% และ 2.1% และผลจากการจำลองพบว่าความเร็วทางเข้าไซโคลนในแนวสัมผัสและแนวแกนมีค่าสูงสำหรับไซโคลนที่มีขนาดทรงกรวยเล็กที่สุด จึงทำให้มีผลประสิทธิภาพการดักจับและความดันสูญเสียสูงสุดเช่นกัน Chuah et al. [10] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วที่เข้าไปในไซโคลนต่อความดันสูญเสีย โดยประยุกต์ใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยรูปแบบ (model) RNG $k-\epsilon$ และ RSM โดยทดลองกับรูปร่างของไซโคลน 2 แบบ คือ แบบ Stairmand high efficiency และแบบ Bohnet พบว่า การจำลองแบบ RSM ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุดกับการทดลองและความดันสูญเสียสูงขึ้นเมื่อความเร็วและอุณหภูมิสูงขึ้น Wan et al. [11] ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งภายในไซโคลนที่ขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน โดยทำการจำลองการไหลแบบ RSM ในไซโคลน พบว่าความเข้มข้นของอนุภาคจะกระจายตัวต่ำในช่วง r/R (สัดส่วนระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวรัศมีและรัศมีของไซโคลน) ≤ 0.75 และกระจายตัวเพิ่มขึ้นจนทั่วผนังของไซโคลนในช่วง $r/R > 0.75$ และอนุภาคเล็กจะสะสมอยู่มากบริเวณภายในของ vortex

วสันต์ [12] ได้ศึกษาจำลองการไหลภายในอุปกรณ์ไซโคลน แบบ 3 มิติ โดยวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method, FVM) ในการหาผลเฉลยสมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์ส นาเวีย-สโตกส์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS) เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดและรูปร่างต่อลักษณะการไหลของไซโคลน จากการศึกษาพบว่าขนาดของไซโคลนมีผลต่อการไหล ซึ่งลักษณะการไหลภายในไซโคลนจะไม่สมมาตร เมื่อขนาดของไซโคลนต่างกันทำให้ ขนาด รูปร่างและตำแหน่งของกระแสไหลวนของอากาศเปลี่ยนไป และการลดความสูงของทรงกรวยทำให้การไหลปั่นป่วนลดลงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับเพิ่มมากขึ้น กัมปนาท [13] ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหลและอนุภาคขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน และความดันสูญเสียของไซโคลน โดยประยุกต์ใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าประสิทธิภาพดักจับอนุภาคและความดันสูญเสียที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Dirigo and Leith [14] และ Yoshida [15] โดยการใช้แบบจำลอง RSM จะให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าใช้แบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG- $k-\epsilon$ เนื่องจากสมมติฐานของค่าความหนืดปั่นป่วนเป็นแบบ non-isotropic ทั้งนี้ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม

ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคนาขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของกระแสอากาศ ทรงฤทธิ์ [16] ได้ทำการศึกษากำลองการไหลของเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนรอบแนวแกน พบว่าการหมุนแบบช้า ๆ สำหรับแบบจำลอง RSM ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และแบบจำลอง RSM แสดงโปรไฟล์ความเร็วที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี

Xiang et al. [18] ได้ศึกษาสมรรถนะของไซโคลนเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของกรวยและอัตราการไหลที่เข้าไซโคลน โดยได้ทำการทดลองเปลี่ยนขนาดของกรวย 3 ขนาดที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 4 ค่า ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนขนาดของกรวยไม่มีผลต่อสมรรถนะของไซโคลน โดยรูปร่างของทรงกรวยมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดักจับเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้กระแสอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง ทรงกรวยที่มีขนาดเล็กทำให้ความเร็วสูงขึ้น อนุภาคจึงเคลื่อนที่เบี่ยงเบนจากกระแสอากาศได้มากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- ศึกษารูปแบบการไหลของกระแสอากาศและการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอโรซอลในอุปกรณ์ไซโคลน-เส้นใยกรอง โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- ศึกษากลไกการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคแอโรซอลของไซโคลน-เส้นใยกรองสำหรับอนุภาคนาเล็ก

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบรูปแบบและลักษณะการไหลของกระแสอากาศและการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอโรซอลในไซโคลน-เส้นใยกรอง
- ได้แนวทางการออกแบบอุปกรณ์เก็บอนุภาคนาไซโคลน-เส้นใยกรองที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สำหรับอนุภาค 0.3-1.0 μm

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- จำลองการไหลของกระแสอากาศและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน เพื่อศึกษาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน และคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคสำหรับอนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ 1.0 μm

- จำลองการไหลของกระแสอากาศและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน ที่ทำการติดตั้งเส้นใยกรองเพื่อศึกษาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน และคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคสำหรับอนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ 1.0 μm มีตัวแปรที่ศึกษา คือการวางตัวของเส้นใยกรอง 2 รูปแบบ บรรจุนระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกไซโคลน คือ แบบครีบ และแบบบรรจุเต็มช่องว่าง

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดักจับอนุภาคแอโรซอลด้วยอุปกรณ์ดักจับชนิดไซโคลน-เส้นใยกรองโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไซโคลนและเส้นใยกรอง คือส่วนประกอบของไซโคลน ขั้นตอนการทำงานของไซโคลน ลักษณะสมบัติทั่วไปของไซโคลน ขนาดตัด (cut size) ประสิทธิภาพของไซโคลน (cyclone collection efficiency) ความดันสูญเสีย (pressure drop) กลไกในการดักจับอนุภาค แบบจำลองการไหลปั่นป่วน สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลน และสมการการไหลผ่านวัสดุรูพรุน

2.1 ไซโคลน

ไซโคลนมีหน้าที่ในการดักและแยกอนุภาคของแข็งออกจากกระแสอากาศ (หรือก๊าซ) โดยอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาถูก สามารถแยกฝุ่นที่มีปริมาณหรือความเข้มข้นมากได้ดี รวมถึงไม่ต้องดูแลรักษามากนักเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว แต่ไซโคลนก็มีข้อจำกัดในการดักจับอนุภาค คือถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า $10 \mu\text{m}$ ไซโคลนจะไม่สามารถดักจับอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้อนุภาคที่เล็กกว่า $10 \mu\text{m}$ สามารถปะปนมากับกระแสอากาศได้ [19] ซึ่งรายละเอียดของไซโคลนจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.1.1 ส่วนประกอบของไซโคลน

รูปร่างของไซโคลนโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของไซโคลนและหน้าที่แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้ [19]

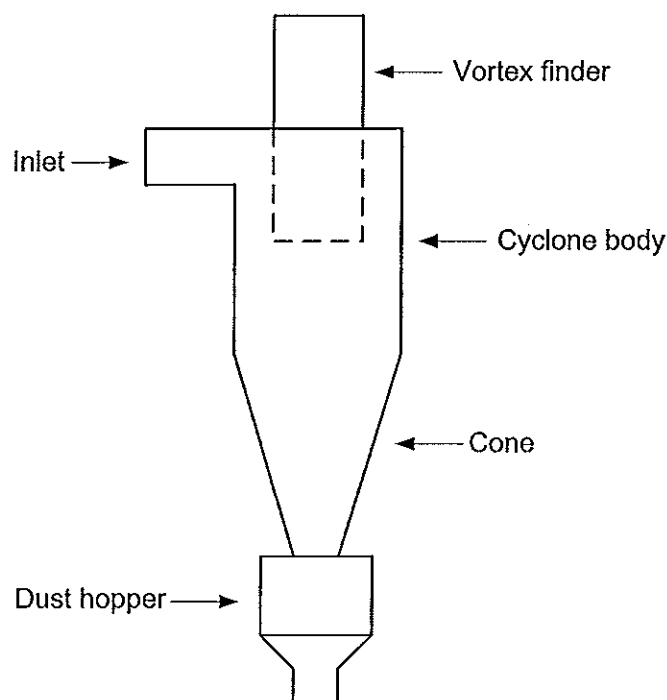
1. ท่อทางเข้า (inlet) เป็นท่อติดตั้งตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของทรงกระบอก ใช้บังคับให้กระแสอากาศเปลี่ยนทิศทางการไหล จากการไหลแบบตรงเป็นการไหลเวียนแบบก้นหอย (spiral flow) เข้าสู่ไซโคลน

2. ท่อทรงกระบอก (cyclone body) เป็นท่อกลวงรูปทรงกระบอก ใช้เป็นแนวปะทะของฝุ่น เพื่อเป็นพื้นที่ในการดักฝุ่น และเพื่อลดพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่

3. กรวยไซโคลน (cone) เป็นกรวยกลวงยอดตัด ใช้เพื่อช่วยลดความยาวของทรงกระบอกลงไม่ให้ไซโคลนสูงเกินไป และช่วยเป็นแนวปะทะบังคับให้กระแสอากาศที่หมุนเวียนเปลี่ยนทิศทางการไหลย้อนกลับขึ้นบนได้

4. ที่รองรับฝุ่น (dust hopper) ใช้รองรับฝุ่นที่แยกจากกระแสอากาศเพื่อนำออกจากไซโคลนกำจัดทิ้งต่อไป

5. ท่อทางออกของอากาศ (vortex finder) ใช้ระบายกระแสอากาศที่ได้แยกฝุ่นบางส่วนออกมา



รูปที่ 2.1 ลักษณะของไซโคลน

2.1.2 ขั้นตอนการทำงานของไซโคลน

การแยกอนุภาคออกจากกระแสอากาศของไซโคลนใช้กลไกหลัก คือแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. รูปแบบการไหลเวียนของกระแสอากาศ (airflow patterns) เมื่อกระแสอากาศถูกป้อนเข้าในแนวสัมผัสบริเวณส่วนบนของทรงกระบอก จะถูกชักนำให้เกิดวอร์เทคหรือการไหลเวียนแบบก้นหอยระหว่างผนังท่อทางออกกระแสอากาศ ลักษณะการไหลเป็นแบบหมุนวนเวียนลงด้านล่าง เมื่อเข้าใกล้ก้นกรวย วอร์เทคจะถูกบังคับให้กลับทิศทางการไหล เปลี่ยนเป็น

หมุนเคลื่อนที่ขึ้นแทรกผ่านด้านใน (inner vortex) เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นวอร์เทกแบบบังคับ (forced vortex) ซึ่งเรียกวอร์เทกที่เกิดด้านในนี้ว่า แกน (core) ส่วนบนของไซโคลอนบริเวณช่องว่างระหว่างไซโคลอนและท่อทางออก ความเร็วที่สัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากผนังไซโคลอนถึงผนังท่อทางออก ทำให้เกิดการไหลของกระแสอากาศสืบผนังส่วนบนของทรงกระบอก พัดพาฝุ่นให้ไหลเวียนตาม จึงทำให้ฝุ่นมีโอกาสหลุดติดกับกระแสอากาศที่ไหลออกจากไซโคลอนสู่บรรยากาศได้ซึ่งลักษณะการไหลของกระแสอากาศแบบนี้เรียกว่าการไหลวน (eddy flow)

2. การแยกฝุ่นในวอร์เทก (separation of dust in the vortex) ผลจากการเกิดวอร์เทกช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางขึ้น ทำให้ฝุ่นที่แขวนลอยเคลื่อนตัวเข้าปะทะผนังด้านในไซโคลอน เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่และแยกตัวออกจากวอร์เทกเคลื่อนที่ลงสู่เบื้องล่าง

3. การปล่อยฝุ่นที่แยกแล้ว (discharge of separated dust) ฝุ่นที่ปะทะผนังไซโคลอนจะสูญเสียพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม ฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูงหมุนตัวลงอย่างช้า ๆ และถูกดึงดูดให้เคลื่อนตัวลงสู่ที่รองรับฝุ่นเบื้องล่าง อาศัยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้ฝุ่นสามารถหลุดออกจากวอร์เทกที่กำลังหมุนวนอยู่ได้

2.1.3 ลักษณะสมบัติทั่วไปของไซโคลอน

ไซโคลอนจะมีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องมีลักษณะสมบัติทั่วไปดังต่อไปนี้

1. ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอกมีขนาดเล็กจะจับอนุภาคละเอียดได้

2. ถ้าความเร็วทางเข้าของกระแสอากาศยิ่งสูงความดันสูญเสียก็มากตาม เพราะใช้พลังงานสูงขึ้น

3. ถ้าอนุภาคมีคุณสมบัติเกาะกันเป็นก้อนได้ดี การเพิ่มประสิทธิภาพรวมของการเก็บฝุ่นสามารถทำได้โดยการติดตั้งไซโคลอนอนุกรมกัน

4. ฮอปเปอร์เก็บฝุ่น (dust hopper) ของไซโคลอนควรออกแบบให้มีโครงสร้างที่ป้องกันการหลุดหนีของอนุภาคฝุ่นไปกับกระแสอากาศที่ไหลวนขึ้นนอกจากนี้ฮอปเปอร์ที่ใช้ควรมีความจุเพียงพอโดยคำนึงเผื่อกรณีที่ว่าลิ้นแบบหมุน (rotary valve) ของไซโคลอน และสายพานลำเลียงฝุ่นไม่ทำงานด้วย

เนื่องจากไซโคลอนมีโครงสร้างที่ง่าย ๆ มีราคาถูก และสามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กหลาย ๆ ไมครอน หรือ โดกว่า ดังนั้น จึงมีใช้กันกว้างขวางในอุตสาหกรรม เพื่อเป็นเครื่องเก็บฝุ่นก่อนใช้ถูกรอง หรือเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [20]

2.2 สมรรถนะของไซโคลน (cyclone performance)

สมรรถนะของไซโคลนนั้น พิจารณาจากค่าของความดันสูญเสีย และค่าของประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค ซึ่งประสิทธิภาพการดักจับและขนาดตัด (cut size) ของไซโคลนขึ้นกับขนาดของอนุภาค ความเร็วทางเข้าไซโคลนและรูปร่างของไซโคลน ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นองค์ประกอบของสมรรถนะของไซโคลน [21]

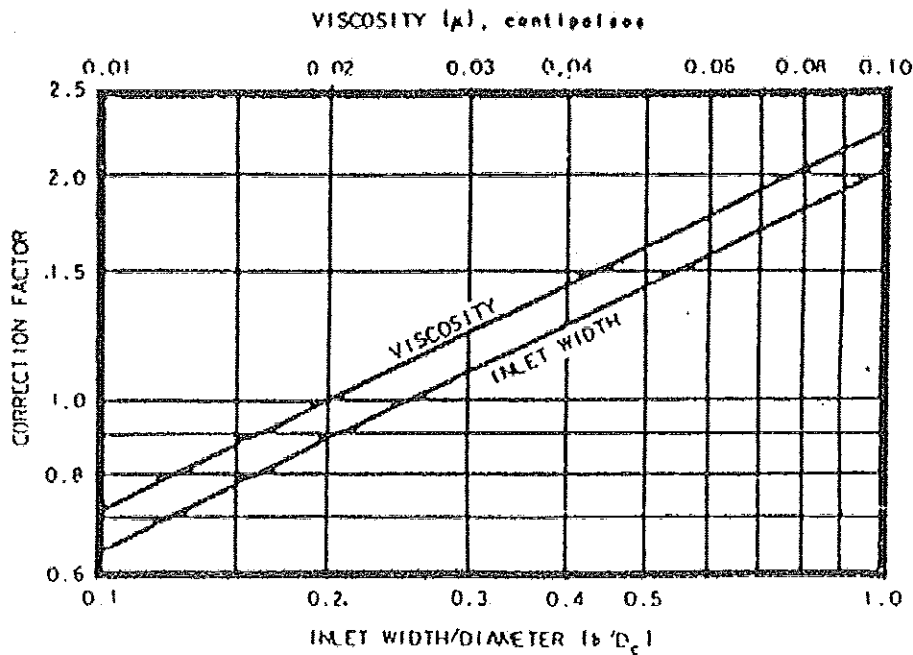
2.2.1 ขนาดตัด (cut size)

ขนาดตัดของอนุภาค (d_{50}) คือขนาดอนุภาคที่ถูกแยกที่ประสิทธิภาพ 50% นั่นคืออนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัดจะถูกไซโคลนดักจับ ส่วนขนาดเล็กกว่าจะหลุดลอยไปกับกระแสอากาศ ขนาดตัดของอนุภาคขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของอากาศและอนุภาค ขนาดของไซโคลนและสภาวะการทำงานของเครื่อง (operating conditions) [22] สมการที่ใช้คำนวณหาขนาดตัดของอนุภาคหาได้จาก [23]-[26] เป็นต้น

Lapple [23] ใช้หลักการสมดุลของแรงเหวี่ยงและแรงเฉื่อย (drag force) ที่กระทำในไซโคลน เพื่อคำนวณหาขนาดตัดของอนุภาค (d_{50}) ซึ่งเป็นขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50% หรือ ขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนนั่นแยกได้ 50% โดยน้ำหนัก ขนาดตัดนี้ใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพในการทำงานของไซโคลนได้ สามารถหาขนาดตัดได้จากสมการข้างล่างนี้ และรายละเอียดของตัวแปรตามดังรูปที่ 2.2

$$d_{50} = 3 \sqrt{\frac{\mu b}{2\pi\rho_p U_i C N_i}} \quad (2.1)$$

โดยที่ d_{50} คือขนาดตัดของไซโคลน (ขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนแยกได้ที่ประสิทธิภาพ 50%) μ คือความหนืดของอากาศ b คือความกว้างของทางเข้าไซโคลน (ตามแนวรัศมี) $N_i = tU_i / \pi D$ คือจำนวนรอบในการหมุนในแนวสัมผัส t คือ เวลาการไหลภายในไซโคลน U_i คือความเร็วของกระแสอากาศเข้าสู่ไซโคลน ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค C คือ slip correction factor หาจากรูปที่ 2.2 และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทรงกระบอก



รูปที่ 2.2 slip correction factors ของอนุภาค [21]

Stairmand [24] และ Barth [25] ได้เสนอว่า d_{50} ถูกดักจับเมื่อเคลื่อนที่หมุนวนลงที่บริเวณกึ่งกลางของทรงกรวย ที่ความเร็วในแนวสัมผัสมีค่ามากที่สุด ซึ่งขนาดตัดสามารถหาได้จากสมการด้านล่างนี้

$$d_{50} = \frac{3}{U_{t\max}} \sqrt{\frac{\mu Q}{\pi \rho_p C(H-S)}} \quad (2.2)$$

โดยที่

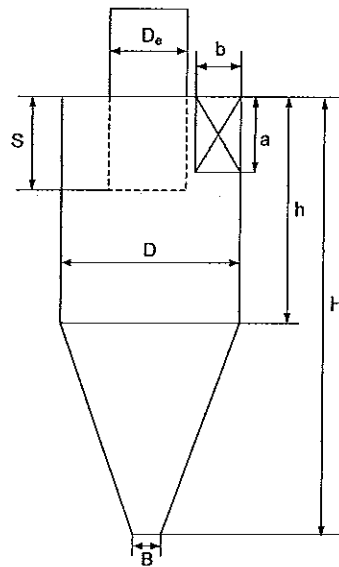
$$U_{t\max} = 6.1 \times U_i \times \left(\frac{ab}{D^2}\right)^{0.61} \times \left(\frac{D_e}{D}\right)^{-0.74} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.33} \quad (2.3)$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหล a คือความสูงของท่อทางเข้าไซโคลน H คือความสูงของไซโคลน S คือความสูงของท่อทางออกภายในไซโคลน และ D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของท่อทางออกของไซโคลนแสดงดังในรูปที่ 2.3

Iozia and Leith [26] ศึกษาโปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสอากาศ
อากาศในไซโคลน และได้พัฒนาสมการในการหาขนาดตัดของอนุภาคดังนี้

$$d_{50} = \frac{3}{U_{t,max} \sqrt{\frac{\mu Q}{\pi \chi_c \rho_p}}} \quad (2.4)$$

และ χ_c คือความสูงของกรวย



รูปที่ 2.3 รายละเอียดตัวแปรของไซโคลน [22]

จากสมการในการหาขนาดตัดที่ได้กล่าวมานั้น จะนำ d_{50} ไปแทนค่าในสมการ
(2.6) เพื่อหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลนต่อไป และมีนักวิจัยได้เสนอสมการ
ประสิทธิภาพการดักจับ ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อต่อจากนี้

2.2.2 ประสิทธิภาพของไซโคลน (cyclone collection efficiency)

ประสิทธิภาพของไซโคลนได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ประสิทธิภาพของไซโคลน
ในรูปของ fractional efficiency (η_i) และประสิทธิภาพของไซโคลนในรูปของ grade efficiency
(η) ซึ่งประสิทธิภาพของไซโคลนในรูปของ fractional efficiency (η_i) หมายถึง สัดส่วน (fraction)
ของอนุภาคขนาดหนึ่งที่ถูกไซโคลนดักจับได้ เมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดนั้นที่เข้าสู่ไซโคลน [21]

และประสิทธิภาพของไซโคลนในรูปของ grade efficiency หมายถึง ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลนรวมตลอดช่วงขนาดอนุภาค โดยเมื่อทราบประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลนในแต่ละช่วงขนาดที่ดักจับได้ ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลนรวมตลอดช่วงขนาดสามารถหาได้โดยการหาผลรวมของค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนักประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลนในช่วงทุกช่วงขนาดโดย

$$\eta = \sum \eta_i w \quad (2.5)$$

โดยที่ η_i คือประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคในแต่ละช่วงขนาด (fractional efficiency) และ w คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคในแต่ละช่วงขนาด [27]

โดยประสิทธิภาพวิธีของ Lapple [23] หาได้จากใช้หลักการสมดุลของแรงเหวี่ยงและแรงจุด (drag) ที่กระทำในไซโคลน สามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพการดักจับได้ดังนี้

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (d_{50} / d_p)^2} \quad (2.6)$$

โดยที่ d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และ d_{50} สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

Barth [25] ได้เสนอสมการการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจากที่ได้ประสบการณ์ในการทดลองออกแบบไซโคลนหลายการทดลอง สามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพการดักจับได้ดังนี้

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi h^* v_i^2 \rho_p d_p^2}{9 \mu Q} \right)^{-3.2}} \quad (2.7)$$

โดยที่ v_i คือความเร็วในแนวสัมผัส h^* คือความสูงของกรวยที่จุดกึ่งกลางของไซโคลน

Leith and Licht [28] ได้พิจารณาเวลาเฉลี่ยในการไหลของอนุภาคกับอากาศที่เป็น การไหลแบบปั่นป่วนภายในไซโคลน สามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพการดักจับ ได้ดังนี้

$$\eta_i = 1 - \exp\left[-2(C_g \psi)^{1/2n+2}\right] \quad (2.8)$$

โดยที่ C_g คือ dimension factor ของไซโคลน ψ คือค่าการชน ($\psi = Stk/2$) และ n คือ vortex exponent

ส่วน Stk นิยามจาก

$$Stk = \frac{C \rho_p d_p^2 U_i}{9 \mu D} \quad (2.9)$$

โดยที่ U_i คือความเร็วทางเข้าของไซโคลน C คือค่าคงตัวของ Cunningham

Dietz [29] ได้พิจารณาบริเวณการไหลของไซโคลนออกเป็น 3 บริเวณ คือทางเข้า ไซโคลน ทรงกระบอกของไซโคลนซึ่งเป็นการไหลลง และทรงกรวยซึ่งเป็นการไหลขึ้น โดย สังเกตการณ์แพร่กระจายของอนุภาคใน 3 บริเวณ สามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพการดักจับ ได้ดังนี้

$$\eta_i = 1 - \left[K_0 - \sqrt{(K_1^2 + K_2)} \right] \times \exp\left[\frac{-\pi D U_{pw} (S - a/2)}{Q} \right] \quad (2.10)$$

โดยที่ U_{pw} คือความเร็วของอนุภาคที่ผนังของไซโคลน ซึ่งตัวแปรอื่น ๆ นั้นดังรูปที่ 2.2

Li and Wang [30] ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการไหลของอนุภาคใน ไซโคลน โดยตัดทอนการแพร่ของการไหลปั่นป่วนภายในของไหลในไซโคลน และให้ความเร็ว ของอนุภาคอยู่ในทิศทางในแกน z และได้พิจารณาทอมการแพร่ในการไหลปั่นป่วนของอนุภาค และอนุภาคที่สะท้อนผนังไซโคลน ซึ่งสามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพการดักจับ ได้ดังนี้

$$\eta_i = 1 - \exp\left[-\lambda \frac{2\pi(S+L)}{a}\right] \quad (2.11)$$

โดยที่ λ คือ characteristic value และ L คือความสูงของไซโคลนที่นิยามโดย $L = 2.3D_e(D^2/ab)^{1/3}$

Iozi and Leith [31] ได้พิจารณาประสิทธิภาพการดักจับจากข้อมูลที่ได้จากทดลอง ซึ่งสามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพการดักจับได้ดังนี้

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (d_{50}/d_p)^\beta} \quad (2.12)$$

โดยที่ d_{50} คำนวณได้จากสมการ (2.4) และ β สามารถคำนวณได้จาก

$$\ln \beta = 0.62 - 0.87 \ln(d_{50}) + 5.21 \times \ln\left(\frac{ab}{D^2}\right) + 1.05 \left[\ln\left(\frac{ab}{D^2}\right) \right]^2 \quad (2.13)$$

Crawford [32] ได้พิจารณาการดักจับอนุภาคของไซโคลนจากสมมุติฐานดังต่อไปนี้ ที่ชั้นขอบเขตของผนังไซโคลนไม่มีแรงเสียดทานจากการไหล ความเร็วสุดท้ายของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นไปตามวิธีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น และผลจากความปั่นป่วนของ eddies การกระจายตัวของอนุภาคทั่วสม่ำเสมอที่หน้าตัดของมุม θ จากสมมุติฐานนี้ประสิทธิภาพการดักจับของไซโคลนหาได้จาก

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{\rho_p Q d_p^2 \theta}{36\mu a (r_2 - \sqrt{r_1 r_2})(r_2 - r_1)}\right) \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$\theta = \frac{\pi(H+h)}{a} \quad (2.15)$$

โดยที่ r_1 คือรัศมีท่อทรงกระบอกของไซโคลน r_2 คือรัศมีท่อทางออกของไซโคลน และ h คือความสูงท่อทรงกระบอกของไซโคลน

2.2.3 ความดันสูญเสีย (pressure drop)

ความดันสูญเสียเป็นปัจจัยที่สำคัญของไซโคลน เป็นค่าที่บอกถึงพลังงานที่ใช้ในการแยกอนุภาคในไซโคลน ความดันสูญเสีย (Δp) สามารถหาได้จากวิธีทั่วไปของ Shepherd and Lapple [33]

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_g v_g^2 H_v \quad (2.16)$$

โดยที่ ρ_g คือความหนาแน่นของกระแสดำอากาศ v_g คือความเร็วของกระแสดำอากาศ H_v คือจำนวน inlet velocity head มาจากสมการ

$$H_v = K \frac{ab}{D_e^2} \quad (2.17)$$

ในที่นี้ K มีค่าเท่ากับ 12 ถึง 18 สำหรับไซโคลนทั่วไปที่มีท่อทางเข้าตามแนวสัมผัส (tangential inlet) ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางกับสถานะในการทำงานและ 7.5 สำหรับไซโคลนที่มีครีบบ a คือความสูงของท่อทางเข้า b คือความกว้างของท่อทางเข้า D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออก

ค่าความดันสูญเสียเป็นฟังก์ชันกับความเร็วทางเข้ากำลังสอง ดังนั้นถ้ากระแสดำอากาศมีความเร็วสูงเกินไปจะทำให้ค่าความดันสูญเสียสูงด้วย แต่ถ้าความเร็วต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพของไซโคลนมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามถ้ากระแสดำอากาศมีความเร็วสูงมากจะทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นต่ำลง เนื่องจากความปั่นป่วนภายในไซโคลน และมีอนุภาคฟุ้งกลับ (resuspension) โดยทั่วไปความเร็วของอากาศที่เข้าไซโคลนที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 15-21 m/s [27] และ Δp ของไซโคลนมีค่าดังนี้

ไซโคลนประสิทธิภาพต่ำ 5–10 cm H₂O

ไซโคลนประสิทธิภาพปานกลาง 10–15 cm H₂O

ไซโคลนประสิทธิภาพสูง 15–20 cm H₂O

ได้มีนักวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการวิจัยและและพัฒนาในรูปแบบของค่า H_v แล้วนำไปแทนในสมการที่ (2.16) ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ค่า H_v ของแต่ละการศึกษา

สมการ Inlet Velocity Head	ที่มา
$H_v = \frac{ab}{D_e^2} \left\{ 24 + \left[\frac{h(H-h)}{D^2} \right]^{\frac{1}{3}} \right\}$	First [34]
$H_v = 4.62 \frac{ab}{DD_e} \left\{ \left[\left(\frac{D}{D_e} \right)^{2n} - 1 \right] \left(\frac{1-n}{n} \right) + f \left(\frac{D}{D_e} \right)^{2n} \right\}$	Alexander [35]
$n = 0.67 D_m^{0.14} \text{ ที่ } 283 \text{ K } \frac{1-n_1}{1-n_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)$	
$f = 0.8 \left[\frac{1}{n(1-n)} \left(\frac{4-2^{2n}}{3} \right) - \left(\frac{1-n}{n} \right) \right] + 0.2 \left[(2^{2n}-1) \left(\frac{1-n}{n} \right) + 1.5(2^{2n}) \right]$	
$H_v = 1 + 2\phi^2 \left[\frac{2(D-b)}{D_e} - 1 \right] + 2 \left(\frac{4ab}{\pi D_e^2} \right)^2$	
$\phi = \frac{- \left[\frac{D_e}{2(D-b)} \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{D_e}{2(D-b)} + \frac{4G^* A}{ab} \right]^{\frac{1}{2}}}{2G^* A / ab}$	Stairmand [36]
$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_e^2) + \pi Dh + \pi D_e S + \frac{\pi}{2} (D+B) \left[(H-h)^2 + \left(\frac{D+B}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	

ตารางที่ 2.1 ค่า H_v ของแต่ละการศึกษา (ต่อ)

สมการ Inlet Velocity Head	ที่มา
$H_v = \left(\frac{4ab^\theta}{\pi D_e^2} \right)^2 \varepsilon$	
$\varepsilon = \frac{D_e}{D} \left\{ \frac{1}{[1 - 2^\theta (H - S)(\lambda / D_e)]^2} - 1 \right\} + 4.4\theta^{\frac{-2}{3}} + 1$	Barth [25]
$\theta = \frac{\pi D_e (D - b)}{4ab^{\alpha^*} + 2(H - S)(D - b)\pi\lambda} \quad \alpha^* = 1 - \frac{1.2b}{D}$	

โดยที่

- a คือความสูงของท่อทางเข้า
- A คือพื้นที่ผิวภายในของไซโคลน
- b คือความกว้างของท่อทางเข้า
- B คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อทางออกของฝุ่น
- D คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทรงกระบอกของไซโคลน
- D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกของไซโคลน
- D_m คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทรงกระบอกของไซโคลน
- f คือค่าแฟกเตอร์
- G^* คือค่าแฟกเตอร์จากแรงเสียดทาน (0.005)
- h คือความสูงของท่อทรงกระบอกของไซโคลน
- H คือความสูงของไซโคลน
- n คือ vortex exponent
- S คือความสูงของท่อทางออกภายในไซโคลน
- T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์
- α คือค่าแฟกเตอร์
- ε คือค่าแฟกเตอร์

- θ คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วสูงสุดในแนวสัมผัสกับความเร็ทางออก
- λ คือค่าแฟกเตอร์จากแรงเสียดทาน (0.02)
- ϕ คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วสูงสุดในแนวสัมผัสกับความเร็ทางเข้า

เมื่อนำค่า H_v จากตารางที่ 2.1 แทนในสมการ (2.14) จะได้ค่าความดันสูญเสีย แต่สมการนี้ยังไม่แม่นยำจึงมีการเสนอวิธีในการคำนวณความดันสูญเสียที่เป็นทฤษฎีใหม่ไว้ดังนี้

Wang et al. [37] ได้เสนอว่าความดันสูญเสียที่เกิดในไซโคลอนนั้น เกิดขึ้นจากหลายกรณี โดยได้ตั้งสมมติฐานความสูญเสียที่เกิดขึ้น แบ่งได้เป็น 5 กรณี

- ความดันสูญเสียจากทางเข้า
- ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจากพลังงานจลน์
- ความดันสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทาน
- ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจากพลังงานจลน์ของการเกิดการหมุนของกระแสอากาศ
- ความดันสูญเสียจากทางออก
- ความดันสูญเสียนี้เป็นความดันจากความเร็ทางเข้าของไซโคลอนสามารถหาได้จาก

ความดันสูญเสียจากทางเข้า ซึ่งเกิดจากการสูญเสียพลังงานที่ท่อทางเข้าของไซโคลอน หาได้จาก

$$\Delta p_c = C_2 p_{v,in} \quad (2.18)$$

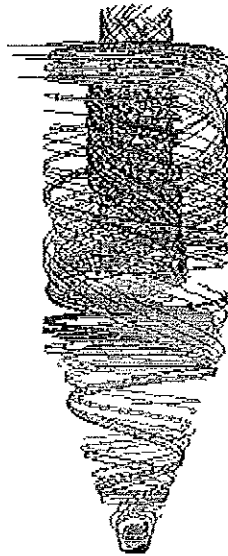
โดยที่ C_2 คือ dynamic loss ($C_2 \approx 1$) และ $p_{v,in}$ คือความดันที่เกิดจากความเร็ทางเข้า

ความดันสูญเสียที่เกิดจากพลังงานจลน์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วจากท่อทางเข้าจนถึงท่อทางออก สามารถหาได้จาก

$$\Delta p_k = p_{v,in} - p_{v,out} \quad (2.19)$$

โดยที่ $p_{v,in}$ คือความดันที่เกิดจากความเร็วทางเข้า และ $p_{v,out}$ คือความดันที่เกิดจากความเร็วทางออก

ความดันสูญเสียที่เกิดแรงเสียดทานเกิดจากความเร็วกว้างที่เคลื่อนที่ผ่านผนังของไซโคลอน ซึ่งกระแสอากาศเคลื่อนที่ภายในไซโคลอนนั้นเป็นกระแสมุมวนลงไปด้วยด้านข้างของไซโคลอน ดังรูปที่ 2.4 โดยกระแสมุมวนที่ทำให้ความสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.4 กระแสมุมวนที่เกิดขึ้นภายในไซโคลอน [37]

โดยความดันสูญเสียที่เกิดแรงเสียดทานสามารถหาได้จาก 2 ส่วน คือส่วนทรงกระบอกของไซโคลอน (Δp_{f1}) และ ส่วนกรวยของไซโคลอน (Δp_{f2})

ความดันสูญเสียในส่วนของทรงกระบอกของไซโคลอนคำนวณได้จาก

$$\Delta p_{f1} = \int_0^{z_1} f \frac{p_{v,s1}}{D_{s1}} V_1 \frac{dz}{V_{z1}} \quad (2.20)$$

โดยที่ f คือ friction factor, $p_{v,s1}$ คือความดันจากความเร็วของกระแสอากาศ ณ เวลาใด ๆ ในทรงกระบอกของไซโคลอน D_{s1} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของกระแสอากาศ ณ เวลาใด ๆ ในทรงกระบอกของไซโคลอน V_1 คือความเร็วของกระแสอากาศ ณ เวลาใด ๆ ในทรงกระบอกของไซโคลอน และ dz คือทิศทางในแนวแกนของระยะทางในทรงกระบอกของไซโคลอน

ส่วนความดันสูญเสียในส่วนของทรงกรวยของไซโคลนคำนวณได้จาก

$$\Delta p_{f2} = \int_{z_2}^0 f \frac{p_{v,s2} V_2}{D_{s2}} \frac{dz}{V_{z2}} \quad (2.21)$$

โดยที่ $p_{v,s2}$ คือความดันจากความเร็วของกระแสอากาศที่ ณ เวลาใด ๆ ในทรงกรวยของไซโคลน D_{s2} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของกระแสอากาศที่ ณ เวลาใด ๆ ในทรงกรวยไซโคลน และ V_2 คือความเร็วของกระแสอากาศ ณ เวลาใด ๆ ในทรงกระบอกของไซโคลน

ดังนั้น ความดันสูญเสียรวมที่เกิดแรงเสียดทานหาได้จาก

$$\Delta p_f = \Delta p_{f1} + \Delta p_{f2} \quad (2.22)$$

การหมุนของกระแสอากาศเข้ามาในไซโคลนดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดความดันสูญเสีย สามารถหาได้จาก

$$\Delta p_r = \rho V_{in}^2 \left(\frac{R}{r_0} - 1 \right) \quad (2.23)$$

โดยที่ R คือรัศมีของไซโคลน และ r_0 คือรัศมีของกระแสอากาศหมุนวน

ความดันสูญเสียนี้เป็นความดันจากความเร็วที่เคลื่อนที่ออกตรงทางออกของไซโคลน สามารถหาได้จาก

$$\Delta p_o = C_3 p_{v,out} \quad (2.24)$$

โดยที่ C_3 คือ dynamic loss ($C_3 \approx 1.8$) และ $p_{v,out}$ คือความดันที่เกิดจากความเร็ทางออก

จากความดันที่เกิดจากทั้ง 5 กรณีเมื่อนำมารวมกันก็จะเป็นความดันสูญเสียรวมสามารถหาได้ดังนี้

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_k + \Delta p_f + \Delta p_r + \Delta p_o \quad (2.25)$$

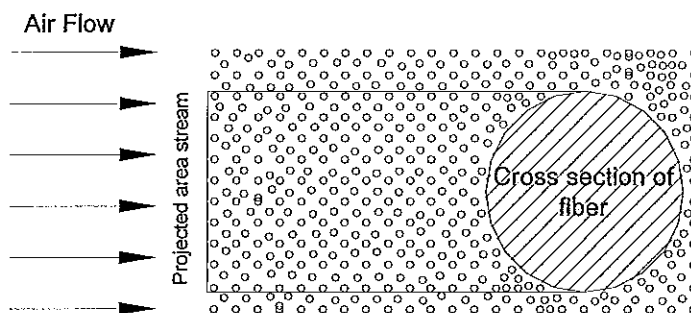
เนื่องจากไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดักจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเส้นใยกรอง (fibrous filter) บรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกไซโคลน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาดเล็กให้ได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มกลไกการดักจับด้วยเส้นใยกรอง มีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.3 เส้นใยกรอง (fibrous filter)

เป็นวัสดุที่ใช้กรองอนุภาคที่ปนมากับกระแสอากาศ และส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในทางการแพทย์ และอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนของหน้ากาก และกรองฝุ่นจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนที่จะปล่อยสู่ออกภายนอก นอกจากนี้ยังใช้สำหรับในการกรองฝุ่นในเครื่องดูดฝุ่น และในเครื่องปรับอากาศ [2] เป็นต้น

2.3.1 กลไกในการดักจับอนุภาค

ในกระบวนการดักจับอนุภาคสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคโดยพิจารณาเส้นใยเพียงเส้นเดียวจากเส้นใยทั้งหมด โดยสมมติให้กระแสอากาศที่มีอนุภาคปะปนมาไหลเข้าชนกับเส้นใยกรองเพียงเส้นเดียวดังรูปที่ 2.5 โดยประสิทธิภาพของเส้นใยกรองเส้นเดียว (single-fiber efficiency) ขึ้นอยู่กับกลไกการดักจับแต่ละชนิด [38]



รูปที่ 2.5 ลักษณะที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านเส้นใยกรองเส้นเดียว [38]

กลไกที่มีบทบาทในการดักจับอนุภาคนั้นมีอยู่ 5 กลไก คือ การสกัดกั้น (interception) กลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อย (inertial impaction) การแพร่ (diffusion) แรงโน้มถ่วง (gravity) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic) โดยส่วนใหญ่กลไกที่มีบทบาทมากนั้นก็คือ กลไกของการสกัดกั้น การกระทบด้วยแรงเฉื่อย และการแพร่ ที่เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เคลื่อนมาตามวิถีของกระแสอากาศ มีรายละเอียดต่อไปนี้

การสกัดกั้น (interception) เกิดจากอนุภาคเล็กที่เคลื่อนที่ตามกระแสอากาศที่ไหลอ้อมเส้นใยมีจุดศูนย์กลางห่างจากเส้นใยคงรูปที่ 2.6 ในระยะที่น้อยกว่ารัศมีของอนุภาคฝุ่น ทำให้สัมผัสกับเส้นใยกรอง และถูกจับเอาไว้ได้ ประสิทธิภาพการจับเก็บอนุภาคด้วยกลไกการสกัดกั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวแปรไร้มิติของการสกัดกั้น R มีค่าเพิ่มขึ้น นิยามตามสมการ

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (2.26)$$

โดยที่ d_p และ d_f คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและเส้นใย ตามลำดับ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ มีโอกาสที่จะถูกจับเก็บไว้ได้ง่ายกว่าโดยประสิทธิภาพของการสกัดกั้นของเส้นใยเพียงเส้นเดียวหาได้จาก

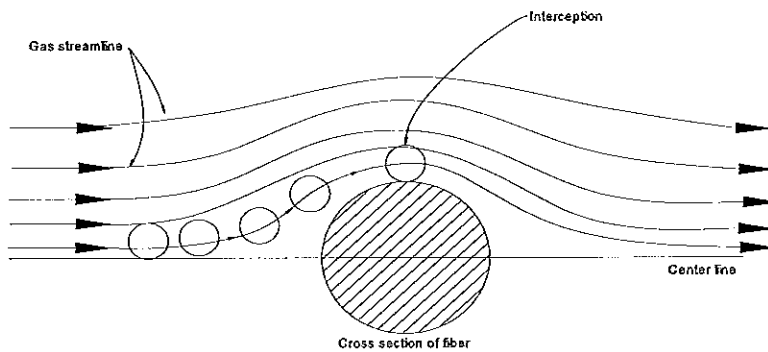
$$E_R = \frac{1}{2Ku} \left[2(1+R) \ln(1+R) - (1+R) + \left(\frac{1}{1+R} \right) \right] \quad (2.27)$$

โดยที่ Ku คือ Kuwabara hydrodynamic factor ซึ่งได้จากตัวแปรไร้มิติจากผลของการเสียรูปของสนามการไหลรอบ ๆ เส้นใยกรอง หาได้จากสมการ

$$Ku = -\frac{\ln \alpha}{2} - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \quad (2.28)$$

ในที่นี้ α คือสัดส่วนของปริมาตรที่มีเส้นใย (volume fraction) นิยามจาก

$$\alpha = \frac{\text{fiber volume}}{\text{total volume}} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.6 การดักจับอนุภาคของเส้นใยกรองเส้นเดี่ยวโดยการสกัดกัน [38]

การกระทบด้วยแรงเฉื่อย (inertial impaction) เกิดจากอนุภาคมีมวลมาก มีความเฉื่อยมาก จนไม่สามารถเคลื่อนตามเส้นกระแสอากาศที่อ้อมเส้นใยกรองได้ อนุภาคจึงชนเข้ากับวัตถุ และถูกเส้นใยกรองจับดังรูปที่ 2.7 ประสิทธิภาพการจับดักเก็บมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า Stokes number ที่เพิ่มขึ้น โดย Stokes number (Stk) ในที่นี้แตกต่างจากสมการ (2.9) เล็กน้อย นิยามจาก

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 C_c U_0}{18 \mu d_f} \quad (2.30)$$

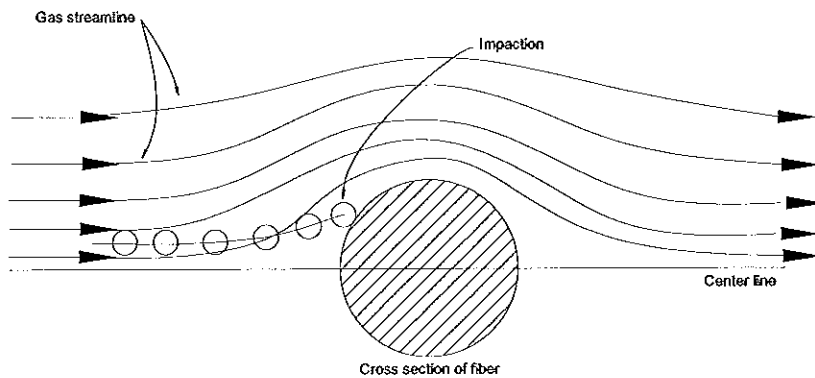
โดยที่ ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่น C_c คือค่าคงตัวของ Cunningham U_0 คือความเร็วที่ไหลผ่านเส้นใยกรอง และ μ คือความหนืดของอากาศที่สภาวะนั้น ๆ

ประสิทธิภาพของการกระทบด้วยแรงเฉื่อยของเส้นใยกรองเส้นเดี่ยวหาได้จาก

$$E_I = \frac{(Stk)J}{2Ku^2} \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$J = (29.6 - 28\alpha^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8} \quad \text{สำหรับ } R > 0.4 \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.7 การดักจับอนุภาคของเส้นใยทรงเส้นเดียวโดยการกระทบด้วยแรงเฉื่อย [38]

การแพร่ (diffusion) เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากซึ่งเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแน่นอน (Brownian motion) อนุภาคจึงอาจเคลื่อนที่เข้าชนเส้นใยได้โดยตรง ดังรูปที่ 2.8 ค่าคงตัวการแพร่ (diffusion coefficient) แปรผกผันกับขนาดอนุภาคฝุ่น ซึ่งประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นมีค่าขึ้นกับ Peclet number (Pe) นิยามจาก

$$Pe = \frac{d_p U_0}{k} \quad (2.33)$$

โดยที่ k คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค และประสิทธิภาพของการแพร่ของเส้นใยทรงเส้นเดียวสามารถหาได้

$$E_D = 2Pe^{-2/3} \quad (2.34)$$

เมื่อประสิทธิภาพของการสกัดกั้นและการแพร่เกิดขึ้นพร้อมกันสามารถได้จาก

$$E_{DR} = \frac{1.24R^{2/3}}{(KuPe)^{1/2}} \quad \text{สำหรับ } Pe > 100 \quad (2.35)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวมของการดักจับอนุภาคทุกกลไกของเส้นใยทรงเส้นเดียวหาได้

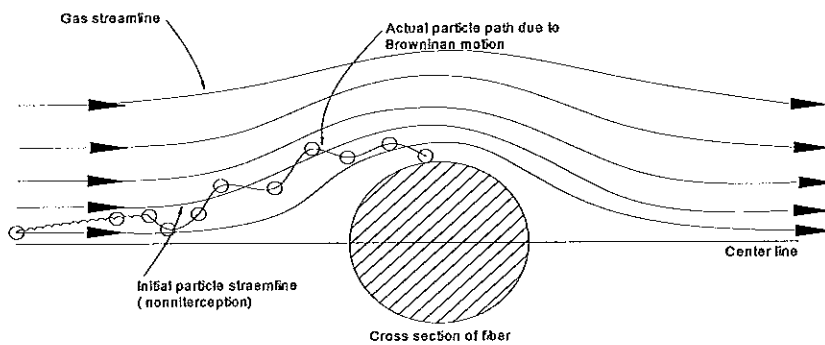
จาก

$$E_{\Sigma} \cong E_R + E_I + E_D + E_{DR} \quad (2.36)$$

และประสิทธิภาพการกรองรวมของแผ่นกรอง (overall efficiency) สามารถหาได้จาก

$$E = 1 - \exp\left(\frac{-4\alpha E_{\Sigma} t}{\pi d_f}\right) \quad (2.37)$$

โดยที่ t คือความหนาของแผ่นกรอง



รูปที่ 2.8 การดักจับอนุภาคของเส้นใยกรองเส้นเดียวโดยการแพร่ [38]

ในการจำลองการไหลของกระแสน้ำในอากาศในไซโคลน-เส้นใยกรอง จำเป็นต้องใช้มีความเข้าใจในทฤษฎีของการไหลของของไหล โดยรายละเอียดได้แสดงในหัวข้อต่อไปนี้

2.4 ลักษณะทั่วไปของการไหล

ของไหลโดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งลักษณะของการไหลได้เป็น 2 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยปกติสามารถแบ่งการไหลได้โดยใช้ค่าของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re) สำหรับการไหลภายนอกผ่านแผ่นเรียบ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Re_L) นิยามจาก

$$Re_L = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.38)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของของไหล v คือความเร็วเฉลี่ยของการไหล L คือความยาวคุณลักษณะของวัตถุที่ของไหลไหลผ่าน และ μ คือความหนืดของของไหล

การไหลผ่านบนแผ่นเรียบ ถ้าค่า $Re_L < 5 \times 10^5$ รูปแบบของการไหลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) เมื่อค่า $Re_L > 5 \times 10^5$ รูปแบบของการไหลจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) [39]

2.5 สมการเชิงอนุรักษ์มวล

สมการเชิงอนุรักษ์มวล (conservation of mass) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่อธิบายการไม่สูญหายของมวล เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สมการต่อเนื่อง (continuity) โดยที่ตัวแปรเหล่านั้นจะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหลซึ่งเขียนเป็นสมการในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.39)$$

โดยที่ \mathbf{V} คือ เวกเตอร์ความเร็ว

สมการนี้อธิบายได้ว่า เทอมแรกด้านซ้ายคืออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในต่อหน่วยปริมาตร ส่วนเทอมที่สองคือการไหลเข้าออกของมวลต่อหน่วยปริมาตร ถ้าเป็นการไหลที่ไม่อัดตัว (incompressible flow) ความหนาแน่น (ρ) จะคงที่ ดังนั้นสมการ (2.39) ลดรูปเหลือ

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.40)$$

2.6 สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) เป็นสมการที่อธิบายจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่ได้มาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับความเร่ง เขียนเป็นสมการโมเมนตัมในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \Delta \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} + \rho \mathbf{g} \quad (2.41)$$

โดยที่ $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ คือความเค้นเนื่องจากความหนืด (viscous stresses)

สมการ (2.41) เขียนในรูปแบบอนุรักษณ์ (conservation form) อธิบายได้ว่าผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม (อัตราการไหลเข้าออกสุทธิของโมเมนตัม) งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) จึงนำกฎความเสียดทานของ สโตกส์ (Stokes's law) ซึ่งความเค้นเนื่องจากความหนืด (viscous stresses) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเครียด (strain rates) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (viscosity coefficient) จะเรียกสมการที่ได้นี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation)

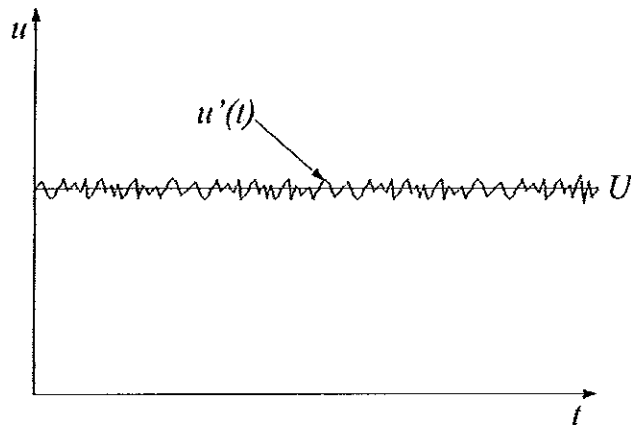
$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (2.42)$$

โดยที่ p คือความดันสถิต \mathbf{g} คือค่าแรงดึงดูดของโลก และ μ คือสัมประสิทธิ์ความหนืด

สมการที่กล่าวมานี้รวมทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการที่หาผลเฉลยยากทางคณิตศาสตร์ไม่ว่าจะเขียนระบบสมการย่อยเหล่านี้ในรูปแบบใดก็ตาม เพราะว่าเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (coupled partial differential equations) ผลลัพธ์ที่หาได้ เช่น u , v , w , p ต้องสอดคล้อง (satisfy) กับทั้งระบบสมการไปพร้อม ๆ กัน และความยากอีกส่วนหนึ่งคือ สมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear equations) เป็นการยากที่จะหาผลเฉลยแน่นอนตรงถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) และลักษณะรูปร่าง (geometry) ของปัญหาจะง่ายก็ตาม จึงทำให้มีวิธีการแก้ปัญหของไหล ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการคำนวณ

2.7 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีความเร็วไม่สม่ำเสมอและมีทิศทางเคลื่อนที่ไม่แน่นอน โดยธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วนความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลาและตำแหน่ง [40] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การวัดความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน

สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$u(x,t) = \bar{u}(x) + u'(x,t) \quad (2.43)$$

โดยที่ $\bar{u}(x)$ คือความเร็วเฉลี่ย (time average velocity) $u'(x,t)$ คือความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด (velocity fluctuation)

จากสมการ (2.43) สามารถอธิบายได้ว่าความเร็วของของไหลสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าเท่ากับความเร็วเฉลี่ย (time-average velocity) บวกกับความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด (velocity fluctuation) จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging, T) จะได้ว่า

$$\bar{u}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(x,t) dt \quad (2.44)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ค่าเฉลี่ยของ fluctuation นั้นมีค่าเป็นศูนย์ [$\overline{u'(x,t)} = 0$] เช่นเดียวกัน เมื่อทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งให้กับสมการอนุพันธ์เชิงมวลและโมเมนตัม จะได้ว่า

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.45)$$

$$\rho \overline{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_j}{\partial x_j} \quad (2.46)$$

สมการที่ (2.45) และ(2.46) นี้เรียกว่า Reynold-Averaged Navier-Stokes (RANS) : สังเกตได้ว่าสมการ (2.46) มีเทอมของ τ_j คือความเค้นเรย์โนลด์ส ซึ่งเทอมนี้เป็นผลของการไหลปั่นป่วน ทำให้ไม่สามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ได้ เนื่องจากจำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองกึ่งทดลอง (semi-empirical model) ความปั่นป่วนมาเข้าช่วยในการคำนวณ ซึ่งในการเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนนี้ต้องขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะทางฟิสิกส์ของการไหล ประเภทของปัญหาและระดับของความแม่นยำที่ต้องการ

2.8 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน

ในการทำนายการไหลภายในไซโคลน แบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ คือ Standard $k-\varepsilon$ model, Renormalization-group (RNG) $k-\varepsilon$ model และ Reynolds Stress Model (RSM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.8.1 แบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$

ในแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ เทอมความเค้นเรย์โนลด์สถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราความเค้นเฉื่อย โดย eddy-viscosity จะถูกกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulent kinetic energy, k) และอัตราการสูญเสียสลาย (dissipation rate, ε) โดยใช้สมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$-\rho \overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (2.47)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.48)$$

โดยที่ μ_t คือความหนืดปั่นป่วน (eddy viscosity) k คือค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และ ε คืออัตราสูญเสียสลายแบบปั่นป่วน เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.50)$$

โดยที่ $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ G คือ production rate of turbulence และ σ_ε คือ Prandtl/Schmidt number

เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$G = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right] \quad (2.51)$$

โดยที่ค่า $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε เป็นค่าคงที่ มีค่าดังนี้ $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\varepsilon = 1.30$

2.8.2 แบบจำลอง Renormalization-group (RNG) $k - \varepsilon$

แบบจำลอง Renormalization-group (RNG) $k - \varepsilon$ ในการหาค่าความเค้นเรย์โนลด์ส์ใช้สมการสมมติฐานของ Boussinesq แต่ค่าคงที่ C_μ ของแบบจำลอง (RNG) $k - \varepsilon$ มีค่าเท่ากับ 0.0845 ซึ่งรูปสมการที่ใช้ในการหาค่า k และ ε หาได้จาก

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u_i k}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u_i \varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (2.53)$$

โดยที่ $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.393$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$ และ $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ค่าหา R หาได้จาก

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.54)$$

โดยที่ $\eta = Sk/\varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$ และ $\beta = 0.012$ เมื่อแทนค่า R ลงในสมการ (2.53) จะได้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ในรูปสมการใหม่คือ

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho u_i \varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C'_{2\varepsilon} \rho_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.55)$$

โดยที่

$$C'_{2\varepsilon} = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (2.56)$$

สำหรับ G_k คืออัตราการเกิดพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน หาได้จาก

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.57)$$

โดยที่

$$S = \sqrt{2S_{ij}} \quad (2.58)$$

และ

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.59)$$

2.8.3 แบบจำลอง Reynolds Stress Model (RSM)

สำหรับแบบจำลอง RSM นั้นการหาค่าความเค้นเรย์โนลด์ส์ [41] มีรูปแบบสมการเป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho U_k u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + II_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2.60)$$

เทอมทางด้านซ้ายมือ 2 เทอม คือความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเทอมการพาตามลำดับ ในที่นี้ D_{ij} คือการแพร่การปั่นป่วน P_{ij} คือผลคูณความเค้น II_{ij} คือความเครียดจากความดัน ε_{ij} คืออัตราการแพร่กระจาย โดยแต่ละตัวสามารถหาได้จาก

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + (\overline{p' u'_j}) \delta_{ik} + (\overline{p' u'_i}) \delta_{jk} - \mu \left(\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u'_i u'_j} \right) \right] \quad (2.61)$$

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] \quad (2.62)$$

$$\Pi_{ij} = p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.63)$$

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (2.64)$$

แบบจำลอง RSM เหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการไหลในลักษณะหมุนวน ซึ่งให้คำตอบออกมาชัดเจนกว่าแบบจำลองอื่น ๆ จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แต่แบบจำลองนี้มีความซับซ้อนในการแก้สมการ ซึ่งทำให้ผลเฉลยที่แก้ออกมานั้นผู้เข้าหาคำตอบได้ยากกว่าแบบจำลองอื่น ๆ จึงต้องอาศัยกริดที่มีคุณภาพเพื่อทำให้การแก้สมการของแบบจำลองนี้มีผลเฉลยผู้เข้าหาคำตอบง่ายขึ้น และงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการไหลของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยกรอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอนุภาคในไซโคลน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.9 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลน

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอนุภาคในงานวิจัยนี้ ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Eulerian ในการแก้ปัญหาของไหลแบบต่อเนื่อง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Lagrangian เพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาคภายในโดเมนที่พิจารณา [42] โดยสมการ โมเมนตัมของอนุภาคในการไหล (Eulerian) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (u_g + u'_g + u_p) - g \quad (2.65)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (v_g + v'_g + v_p) + \frac{w_p^2}{r_0} \quad (2.66)$$

$$\frac{dw_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (w_g + w'_g + w_p) - \frac{u_p w_p}{r_0} \quad (2.67)$$

โดยที่ตัวห้อย p หมายถึงอนุภาค และ g หมายถึงอากาศ u_p, v_p, w_p คือความเร็วในทิศทาง i, j และ k ส่วน u'_g, v'_g, w'_g คือความเร็วที่เกิดการผันผวนในทิศทาง i, j และ k

ค่า τ หาได้จาก

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{24}{C_D Re_p} \quad (2.68)$$

โดยที่ Re_p คือ Reynolds number ของอนุภาค ซึ่งหาได้จาก

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (2.69)$$

ในที่นี้ u คือ ความเร็วของไหล μ คือสัมประสิทธิ์ความหนืด ρ คือความหนาแน่น d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค C_D คือ drag coefficient ซึ่งหาได้จาก

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p} \quad (2.70)$$

ค่า a_1, a_2 และ a_3 คือค่าคงที่ทรงกลมที่ราบเรียบของอนุภาคในช่วงของ Re_p

ในการเคลื่อนที่ภายในไซโคลอนนั้น มีการเคลื่อนที่ระหว่างอากาศและอนุภาค โดยสมการ โมเมนตัมที่เคลื่อนที่ผ่านแต่ละ control volume สามารถเขียนได้ดังนี้

$$F = \sum \left(\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D \text{Re}_p}{24} (u_p - u) + F_{other} \right) m \Delta t \quad (2.71)$$

โดยที่ F_{other} คือแรงเพิ่มเติมที่กระทำกับอนุภาค m คืออัตราการไหลของอนุภาค Δt คือเวลาแต่ละช่วง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการไหลของกระแสอากาศผ่านเส้นใยกรองที่ติดตั้งในไซโคลน ซึ่งการจำลองในงานวิจัยนี้ได้สมมุติว่าเส้นใยกรองนั้นเป็นเหมือนวัสดุรูพรุน จึงต้องศึกษาการไหลผ่านวัสดุรูพรุน เพื่อนำความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในการจำลองในงานวิจัยต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.10 สมการการไหลผ่านวัสดุรูพรุน

วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในเงื่อนไขขอบเขตของงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เส้นใยกรองเปรียบเสมือนกับวัสดุรูพรุน ซึ่งการไหลของของไหลผ่านวัสดุรูพรุนนั้นจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของวัสดุรูพรุนกับของไหลเป็นผลให้เกิดความดันสูญเสีย ซึ่งความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากสมการ โมเมนต์ัมของวัสดุรูพรุน [43] ดังต่อไปนี้

$$S = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v + C \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \quad (2.72)$$

โดยที่ S คือแหล่งพลังงาน v คือความเร็ว μ คือความหนืด $1/\alpha$ คือความต้านเชิงความหนืด C คือ ความต้านเชิงความเฉื่อย ρ คือความหนาแน่นและ

$$\Delta p = -S \Delta n \quad (2.73)$$

โดยที่ Δp คือความดันสูญเสีย และ Δn คือความหนาของวัสดุรูพรุน ดังนั้นความดันสูญเสียหาได้จาก

$$\Delta p = \left[\frac{\mu}{\alpha} v + C \frac{1}{2} \rho v^2 \right] \Delta n \quad (2.74)$$

สมการที่ (2.74) เทอมแรกด้านซ้ายมือเป็นการไหลในวัฏศรพจนแบบราบเรียบ และเทอมที่สองนั้นเป็นการไหลในวัฏศรพจนแบบปั่นป่วน ซึ่งในการคำนวณการไหลผ่านวัฏศรพจนด้วยการวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นต้องระบุค่า ความต้านเชิงความหนืดและความต้านเชิงความเฉื่อยเพื่อเป็นเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งทั้งสองค่านี้หาได้จากการทดลองหาค่าความดันสูญเสียจากการไหลผ่านเส้นใยกรอง จากนั้นจึงนำค่าความดันสูญเสียเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการที่ (2.74) ซึ่งรายละเอียดจากทดลองและการหาค่าความต้านเชิงความหนืดและความต้านเชิงความเฉื่อยนั้นได้กล่าวในบทที่ 4

บทที่ 3

ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยที่ประกอบไปด้วยสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งสมการเหล่านี้สามารถแก้ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method, FDM) วิธีหน่วยสี่เหลี่ยม (finite element method, FEM) และวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method, FVM) ซึ่งทั้ง 3 วิธีนี้ วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมเหมาะสมสำหรับการคำนวณการไหลของของไหล ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ในคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method)

วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมจะทำการจัดสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตบนจุดต่าง ๆ ของปริมาตรควบคุม (control volume) แล้วกำหนดค่าขอบเขตเพื่อให้สามารถแก้สมการในระบบได้ เพื่อการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) ในการแก้ระบบสมการจะใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ (iteration) สมการควบคุมของการไหลสามารถเขียนได้ในรูปแบบทั่วไปซึ่งเรียกว่า สมการควบคุมพื้นฐาน [40] ได้ดังนี้

3.1.1 สมการควบคุมพื้นฐาน

สำหรับระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมในปัญหาของการไหลสามารถจัดรูปแบบของสมการพื้นฐานของการไหลให้อยู่ในรูปของสมการควบคุมพื้นฐานในรูปของตัวแปร ϕ

$$\nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (3.1)$$

โดยที่ ϕ คือฟังก์ชันการไหลขึ้นอยู่กับสมการการไหล Γ คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย S คือพลังงานภายในของฟังก์ชันการไหล และ ρ คือความหนาแน่นของฟังก์ชันการไหล

โดยแต่ละเทอมในสมการ (3.1) สามารถอธิบายได้ดังนี้ เทอมทางด้านซ้ายมือคือ อัตราการไหลสุทธิของฟลักซ์ที่ไหลออกอภิมณฑลของไหลเนื่องจากการพา (convection term) ด้านขวาของสมการเทอมแรกคืออัตราการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์เนื่องจากการแพร่ (diffusion term) ส่วนเทอมสองด้านขวามือคืออัตราการเพิ่มขึ้นของแหล่งกำเนิดของฟลักซ์การไหล (source term)

จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม แล้ว ดิสครีไทซ์ (discretize) ลงบนจุดต่าง ๆ บนปริมาตรควบคุม ซึ่งกำหนด $\phi = 1, u, v$ และ i เพื่อ เปลี่ยนรูปแบบสมการพื้นฐานจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเป็นสมการเชิงพีชคณิต

$$\int_{CV} \nabla(\rho\phi u) dV = \int_{CV} \nabla(\Gamma \nabla \phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.2)$$

3.1.2 การพา

ในปัญหาการพา (convective problem) ทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้สมการรูปทั่วไปที่สถานะคงตัว เมื่อพิจารณาเทอมการพาแบบ 2 มิติเพียงเทอมเดียว จากสมการที่ (3.1) จะได้

$$\nabla \cdot (\rho\phi \mathbf{V}) = 0 \quad (3.3)$$

เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดฉากแบบ 2 มิติ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} = 0 \quad (3.4)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมใน 2 มิติ จะได้

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dx dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} dx dy = 0 \quad (3.5)$$

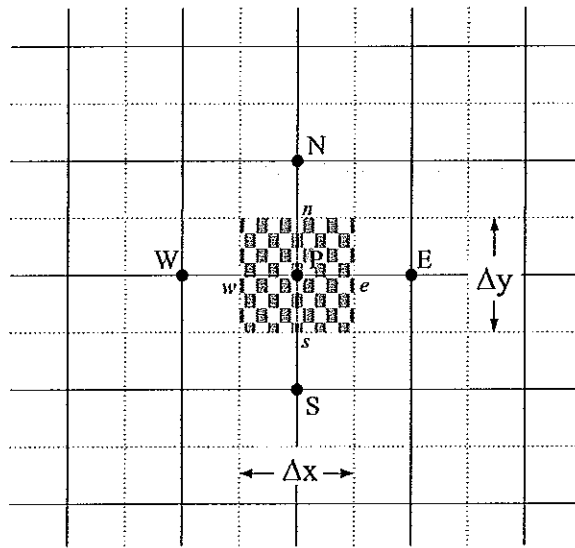
จากรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาที่จุด P จะเห็นว่าจุดต่อนี้มีจุดต่อข้างเคียง ได้แก่ จุดต่อ E และ W ในแนวแกน x และ จุดต่อ N และ S ในแนวแกน y ซึ่งขอบเขตของปริมาตรควบคุมในแต่ละด้านคือ e, w, n และ s โดยกำหนด $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ และ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ ดังนั้นจะได้เทอมการพาคือ

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w + (\rho v A \phi)_n - (\rho v A \phi)_s = 0 \quad (3.6)$$

หรือ

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w + F_n \phi_n - F_s \phi_s = 0 \quad (3.7)$$

โดยที่ $F = \rho u A$ คือ convective mass flux และ ϕ_e, ϕ_w, ϕ_n และ ϕ_s เป็นค่าของ ϕ ที่ผนังเซลล์หาได้โดยการประมาณค่า (interpolation)



รูปที่ 3.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสองมิติ

3.1.3 การแพร่

ในปัญหาการแพร่กระจาย (diffusion problem) ทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้สมการรูปทั่วไปที่สถานะคงตัว เมื่อพิจารณาเทอมการแพร่กระจายแบบ 2 มิติ เพียงเทอมเดียว จากสมการที่ (3.1) จะได้สมการของการแพร่กระจาย ดังนี้

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) = 0 \quad (3.8)$$

เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดฉากแบบ 2 มิติ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.9)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมใน 2 มิติ จะได้

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = 0 \quad (3.10)$$

จากรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาที่จุด P จะเห็นว่าจุดต่อนี้มี จุดต่อข้างเคียง ได้แก่ จุดต่อ E และ W ในแนวแกน x และ จุดต่อ N และ S ในแนวแกน y ซึ่งขอบเขตของปริมาตรควบคุมในแต่ละด้านคือ e , w , n และ s โดยกำหนด $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ และ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ จะได้เทอมการแพร่คือ

$$\left[\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] = 0 \quad (3.11)$$

หรือ

$$D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) + D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) = 0 \quad (3.12)$$

โดยที่ $D_w = \Gamma A / \delta$ คือ ค่า diffusion conductance

3.1.4 แหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิด (source, S_ϕ) สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าคงที่ (S_C) และส่วนที่เป็นสัมประสิทธิ์ของ ϕ_P (S_P)

$$S_\phi = S_C + \phi_P (S_P) \quad (3.13)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมจะได้

$$\int_{\Delta V} S_{\phi} dx dy = S_{\phi} V = S_C V + S_P V \phi_P \quad (3.14)$$

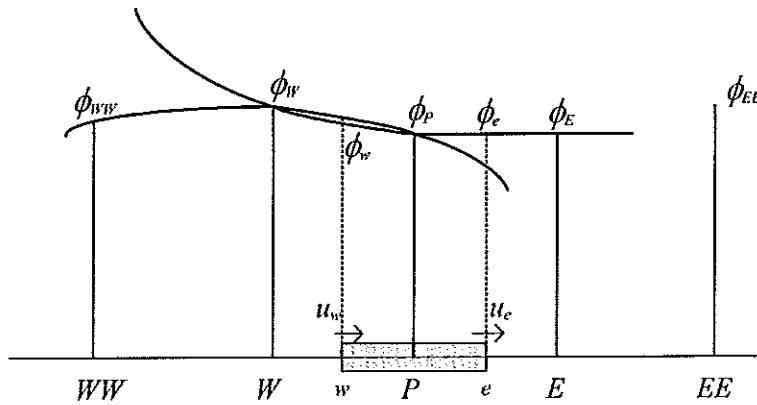
โดยที่ V คือ ปริมาตรควบคุม

3.2 การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว

ในการประมาณค่าของฟลักซ์บนผิวของปริมาตรควบคุมในเทอมการพาสามารถที่หาได้จากการประมาณค่าในระเบียบวิธีการต่าง ๆ ซึ่งมีระเบียบวิธีอยู่หลายวิธี เช่น ระเบียบวิธีผลต่างอันดับหนึ่ง (first order upwind) ระเบียบวิธีผลต่างอันดับสอง (second order upwind) ระเบียบวิธีผลต่างแบบ power law ระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก (quadratic upwind interpolation for convective kinematics, QUICK) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกการประมาณค่าของฟลักซ์บนผิวของปริมาตรควบคุมในเทอมการพาด้วยระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK เนื่องจากสามารถประมาณค่าฟลักซ์บนผิวของปริมาตรควบคุมในเทอมการพาได้ใกล้เคียงกับการทดลองและเหมาะสมกับแบบจำลองในงานวิจัยมากที่สุด [41] โดยรายละเอียดของวิธี มีดังนี้

3.2.1 ระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK

ระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics) เป็นการประมาณค่าเทอมการพา โดยใช้สามจุดในการประมาณค่าของฟลักซ์บนพื้นผิวของปริมาตรควบคุม ซึ่งค่าฟลักซ์ของพื้นผิวได้มาจาก 2 กริดข้างเคียง คือที่ปลายทางการไหลจุด e (downstream) และอีก 1 กริดที่อยู่ต้นทางการไหลจุด w (upstream) ดังรายละเอียดดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK

การหาค่าพื้นผิวของฟังก์ชันแต่ละจุดนั้นสามารถหาได้จาก

$$\phi_{ace} = \frac{6}{8}\phi_{i-1} + \frac{3}{8}\phi_i - \frac{1}{8}\phi_{i-2} \quad (3.15)$$

โดยที่

$$\phi_w = \frac{6}{8}\phi_W + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{WW} : \quad F_w > 0 \quad (3.16)$$

$$\phi_e = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_W : \quad F_e > 0 \quad (3.17)$$

$$\phi_w = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_W - \frac{1}{8}\phi_E : \quad F_w < 0 \quad (3.18)$$

$$\phi_e = \frac{6}{8}\phi_E + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{EE} : \quad F_e < 0 \quad (3.19)$$

จากเงื่อนไขของสมการ (3.16) ถึงสมการ (3.19) แทนค่าลงในเทอมของการพาของสมการ (3.7) และรวมทั้งในส่วนของเทอมการแพร่ในสมการ (3.12) จะได้

$$\left[F_e \left(\phi_e = \frac{6}{8} \phi_P + \frac{3}{8} \phi_E - \frac{1}{8} \phi_W \right) - F_w \left(\phi_w = \frac{6}{8} \phi_W + \frac{3}{8} \phi_P - \frac{1}{8} \phi_{WW} \right) \right] \quad (3.20)$$

$$= D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปแบบสมการได้ใหม่คือ

$$\left[D_w - \frac{3}{8} F_w + D_e + \frac{6}{8} F_e \right] \phi_P = \left[D_w + \frac{6}{8} F_w + \frac{1}{8} F_e \right] \phi_W + \left[D_e - \frac{3}{8} F_e \right] \phi_E - \frac{1}{8} F_w \phi_{WW} \quad (3.21)$$

เมื่อเขียนให้อยู่ในสมการพีชคณิต คือ

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_{WW} \phi_{WW} \quad (3.22)$$

โดยที่

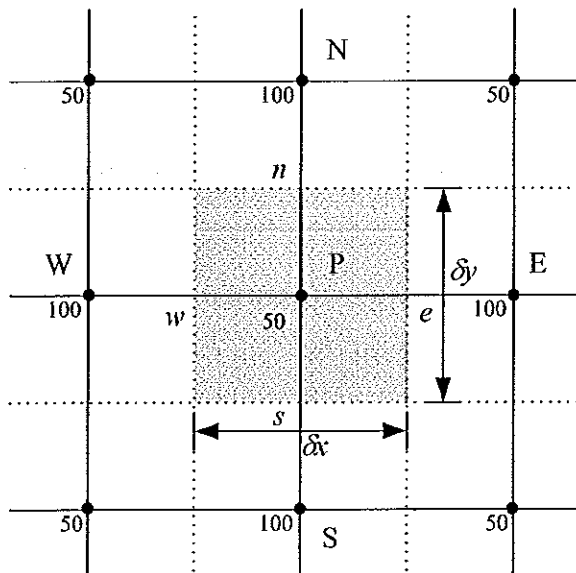
$$a_W = \left[D_w - \frac{3}{8} F_w + D_e + \frac{6}{8} F_e \right] \quad a_E = D_e - \frac{3}{8} F_e$$

$$a_{WW} = -\frac{1}{8} F_w \quad a_P = a_W + a_E + a_{WW} + (F_e - F_w)$$

เนื่องจากการคำนวณค่า u และ v จากสมการโมเมนตัมนั้น ผลที่คำนวณนั้น อาจจะไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง จึงใช้กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) ซึ่งพัฒนาโดย Patankar and Spalding [40] ช่วยในการจัดลำดับของการแก้สมการให้มีความต่อเนื่องเพื่อให้ u , v และ p ที่คำนวณได้นั้นสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ซึ่งขั้นตอนนี้มีลักษณะการวางกริดมาเกี่ยวข้อง ซึ่งการวางกริดที่ไม่ถูกต้องอาจทำให้เทอมของเกรเดียนท์ความดัน (pressure gradient) มีค่าเท่ากับศูนย์ ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้มีค่าผิดไปจากความเป็นจริง เป็นมาผลจากการกระจายความดันแบบ checker-board ในการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยเลือกใช้การวางกริดแบบเยื้องกัน (staggered grid) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3 การวางกริดแบบเยื้องกัน

การวางกริดแบบเยื้องกัน (staggered grid) เป็นการแก้ปัญหาความผิดพลาดในการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้มีค่าผิดไปจากความเป็นจริง เป็นผลจากการกระจายความดันแบบ checker-board ทำให้เทอมของเกรเดียนต์ความดัน (pressure gradient) มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าของความเร็ว u และ v ที่อยู่กับตำแหน่งเดียวกับความดันจึงไม่ได้รับอิทธิพลจากความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้น ส่งผลให้การคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้มีค่าผิดไปจากความเป็นจริง โดยเทอมของเกรเดียนต์ความดันมีค่าเท่ากับศูนย์ได้แสดงรายละเอียดที่จุด P ดังรูปที่ 3.3 จะได้



รูปที่ 3.3 การเกิด checker-board ของความดัน

$$\text{ในแนวแกน } x \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{P_E - P_W}{2\delta x}$$

$$\text{ในแนวแกน } y \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{P_N - P_S}{2\delta y}$$

เมื่อทำการวางกริดแบบเยื้องกัน กริดของความเร็วอยู่ระหว่างจุดต่อของความดัน สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วได้อย่างชัดเจน และแก้ปัญหการกระจายความดันแบบ checker-board ซึ่งทำให้ผลการคำนวณที่ได้จากสมการ โมเมนตัมนั้น

ความดัน แล้วแก้สมการตามปกติเมื่อได้คำตอบแล้วจะทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการสมมุติ แล้วปรับแก้ค่าจนกว่าจะมีค่าใกล้เคียงกันจนยอมรับได้เป็นคำตอบของสมการ

จากการไหลแบบราบเรียบใน 2 มิติ มีสถานะคงตัวในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (2-D laminar steady flow on cartesian coordinates) พิจารณาสมการ โมเมนตัมในแนวแกน x และแกน y ได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + S_x \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + S_y \quad (3.24)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.23) และสมการ (3.24) ตลอดปริมาตรควบคุม จะได้รูปสมการ (discretized form) คือ

$$a_{i,j}u_{i,j} = \sum a_{nb}u_{nb} + (p_{i-1,j} - p_{i,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.25)$$

$$a_{i,j}v_{i,j} = \sum a_{nb}v_{nb} + (p_{i,j-1} - p_{i,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.26)$$

จากนั้นสมมุติค่าความดัน p^* แล้วแก้สมการ โมเมนตัมหาค่า u^* , v^* ดังต่อไปนี้

$$p = p^* + p' \quad (3.27)$$

$$u = u^* + u' \quad (3.28)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.29)$$

เขียนให้อยู่ในรูปสมการ (discretized form) ในแนวแกนได้ดังนี้

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.30)$$

$$a_{i,j}v_{i,j}^* = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.31)$$

นำสมการ (3.30) ลบสมการ (3.31) และสมการ (3.25) ลบสมการ (3.26) ได้ดังนี้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (3.32)$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (3.33)$$

จากนั้นกำหนด $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ ให้เท่าศูนย์ สมการ (3.32) และสมการ (3.33) ลดรูปเป็น

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (3.34)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (3.35)$$

โดยที่

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}, \quad d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}$$

แทนสมการ (3.34) และสมการ (3.35) ด้วย $u = u^* + u'$ และ $v = v^* + v'$ จะได้สมการ velocity correction ดังนี้

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (3.36)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (3.37)$$

ในการทำงานเดียวกันที่จุด $u_{i+1,j}$, $v_{i,j+1}$ ใช้กระบวนการเดียวกับข้างต้นจะได้

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (3.38)$$

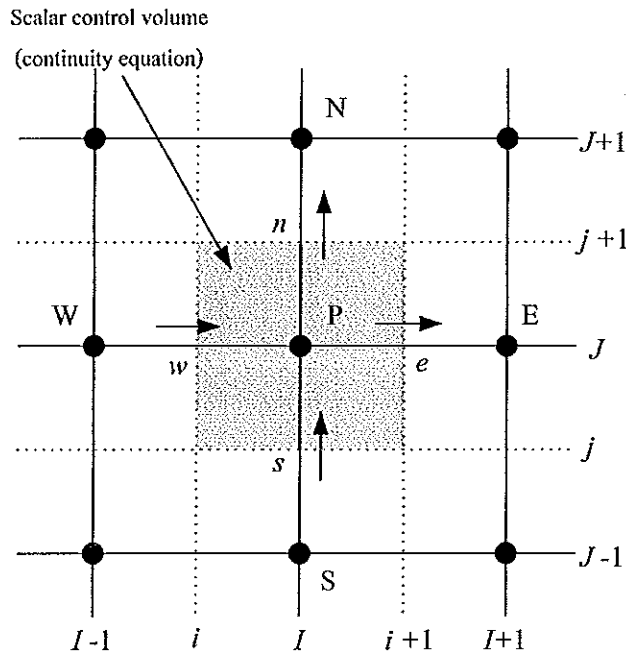
$$v_{i,j+1} = v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1}(p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (3.39)$$

โดยที่

$$d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}}, \quad d_{i,j+1} = \frac{A_{i,j+1}}{a_{i,j+1}}$$

จากสมการข้างต้นสามารถหาค่าของ u และ v แล้วทำการหาค่า p ได้โดยพิจารณาสมการต่อเนื่อง โดยทำการอินทิเกรตสมการตลอดปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.5 ให้อยู่ในรูปสมการ (discretized form) ดังนี้

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{i,j+1} - (\rho v A)_{i,j}] = 0 \quad (3.40)$$



รูปที่ 3.5 สเกลาร์ปริมาตรควบคุมในการ discretized ของสมการต่อเนื่อง

แทนสมการ (3.36) ถึงสมการ (3.39) ลงในสมการ (3.40) จะได้

$$\begin{aligned} & [\rho_{i+1,j} A_{i+1,j} (u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j} (p'_{i,j} - p'_{i+1,j})) - \rho_{i,j} A_{i,j} (u_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}))] \\ & + [\rho_{i,j+1} A_{i,j+1} (v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1} (p'_{i,j} - p'_{i,j+1})) - \rho_{i,j} A_{i,j} (v_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}))] = 0 \end{aligned} \quad (3.41)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} [(\rho dA)_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} + (\rho dA)_{i,j+1}] p'_{i,j} &= (\rho dA)_{i+1,j} p'_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} p'_{i-1,j} \\ &+ (\rho dA)_{i,j+1} p'_{i,j+1} + (\rho dA)_{i,j} p'_{i,j-1} \\ &+ [(\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,j} + (\rho v^* A)_{i,j} + (\rho v^* A)_{i,j+1}] \end{aligned} \quad (3.42)$$

หรือเขียนในรูปเทอมสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$a_{i,j} p'_{i,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{i-1,j} p'_{i-1,j} + a_{i,j+1} p'_{i,j+1} + a_{i,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad (3.43)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_{i,j} &= a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1} \\ a_{i+1,j} &= (\rho dA)_{i+1,j} \\ a_{i-1,j} &= (\rho dA)_{i,j} \\ a_{i,j+1} &= (\rho dA)_{i,j+1} \\ a_{i,j-1} &= (\rho dA)_{i,j} \\ b'_{i,j} &= (\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,j} + (\rho v^* A)_{i,j} - (\rho v^* A)_{i,j+1} \end{aligned}$$

จากสมการปรับค่าความดัน (pressure correction) เมื่อทำการแก้สมการหาค่าความดันในแต่ละรอบการคำนวณหาค่าที่ได้ในรอบแรก ๆ นั้นมีค่าสูงจะเกิดการแกว่งของคำตอบมาก ซึ่งหากเกิดกรณีนี้ขึ้นอาจทำให้คำตอบไม่ลู่เข้า ซึ่งวิธีแก้ของปัญหานี้คือ กำหนดค่า under relaxation factor (α_p) เพิ่มในสมการเพื่อเป็นการลดค่าของความดันที่คำนวณได้ในรอบก่อน แล้วจึงนำไปคำนวณต่อในรอบต่อไป ผลที่ได้คือคำตอบจะไม่ลู่ออกแต่คำตอบที่ได้จะต้องใช้เวลามากขึ้น ในการคำนวณแสดงสมการได้ดังนี้

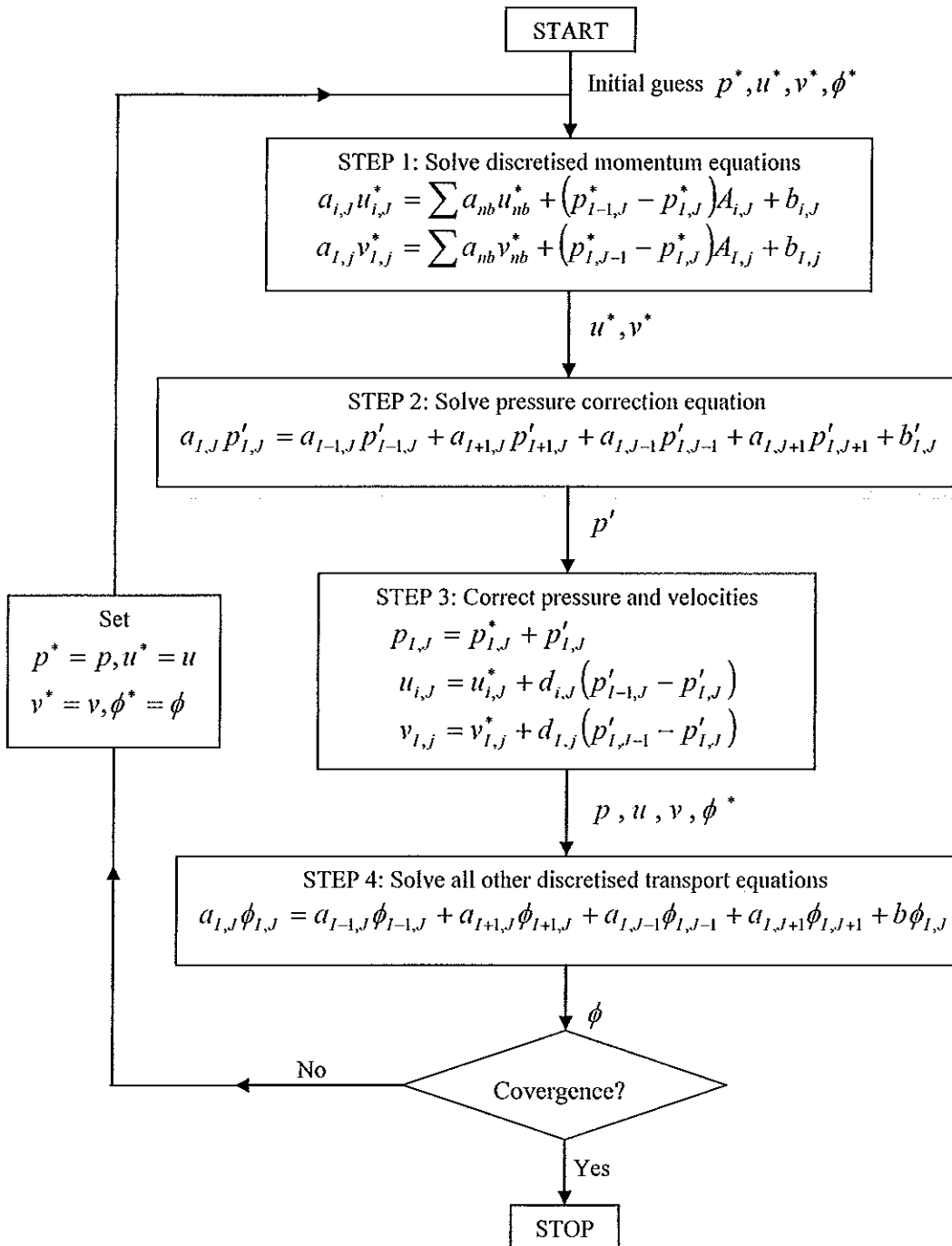
$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (3.44)$$

โดยที่ค่า α_p จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากกำหนดค่านี้ในการคำนวณไว้ค่าจะทำให้การคำนวณนั้นเสถียรกว่าแต่เวลาในการคำนวณเพื่อเข้าสู่คำตอบจะใช้เวลานานและในทำนองเดียวกันการกำหนดค่านี้สามารถใช้ได้กับสมการความเร็วได้ด้วย

$$u^{new} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{(n-1)} \quad (3.45)$$

$$v^{new} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{(n-1)} \quad (3.46)$$

อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าของ α_p จะขึ้นอยู่กับประสบการณ์และปัญหาในแต่ละโดเมน ขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันลำดับขั้นตอนการคำนวณแบบวิธี SIMPLE

บทที่ 4

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดักจับอนุภาคด้วยอุปกรณ์ดักจับชนิดไซโคลน-เส้นใยกรอง โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งใช้โปรแกรม Gambit 2.2.30 สร้างรูปร่างของไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยกรอง และโปรแกรม ANSYS Fluent 12 คำนวณสมการ ที่ได้ในเสนอในบทที่ 2 และ 3 ในบทนี้จะเสนอขั้นตอนการจำลองการไหลและการทดลองที่เกี่ยวข้อง

4.1 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาโดยการนำเอาการวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาแก้ปัญหาของการไหลภายในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยกรอง ซึ่งเป็นการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ประกอบไปด้วยสมการอนุกรมมวล และโมเมนตัม เนื่องจากการไหลในงานวิจัยนี้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน จึงต้องทำการหาค่าเฉลี่ยที่แทนผลของ fluctuation โดยจัดรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปสมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์ส์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) จากนั้นใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical method) ชนิดปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method, FVM) ในการหาผลเฉลยสมการค่าเฉลี่ย ทำการประมาณค่าภายในด้วยแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK ร่วมกับกระบวนการหาค่าตอบแบบ SIMPLE และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) ซึ่งใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 12 ช่วยในการคำนวณ

การสร้างรูปร่างของปัญหาใช้โปรแกรม Gambit 2.2.30 ซึ่งเป็นโปรแกรมสร้างแบบจำลอง กริด และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ของปัญหาที่จะศึกษา จากนั้น import ไฟล์ไปให้โปรแกรม Fluent 12 คำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แล้วนำผลความดันสูญเสีย ความเร็วและประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคที่ได้จากคำนวณได้นั้นเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [4] การคำนวณประสิทธิภาพการดักจับนั้นจะทำการคำนวณเฉพาะกรณีไซโคลนเปล่า สำหรับกรณีไซโคลน-เส้นใยกรองจะอธิบายประสิทธิภาพจากการทดลองด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลและระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เปลี่ยนไป ในการประมวลผลงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Intel Core 2 Duo Processor

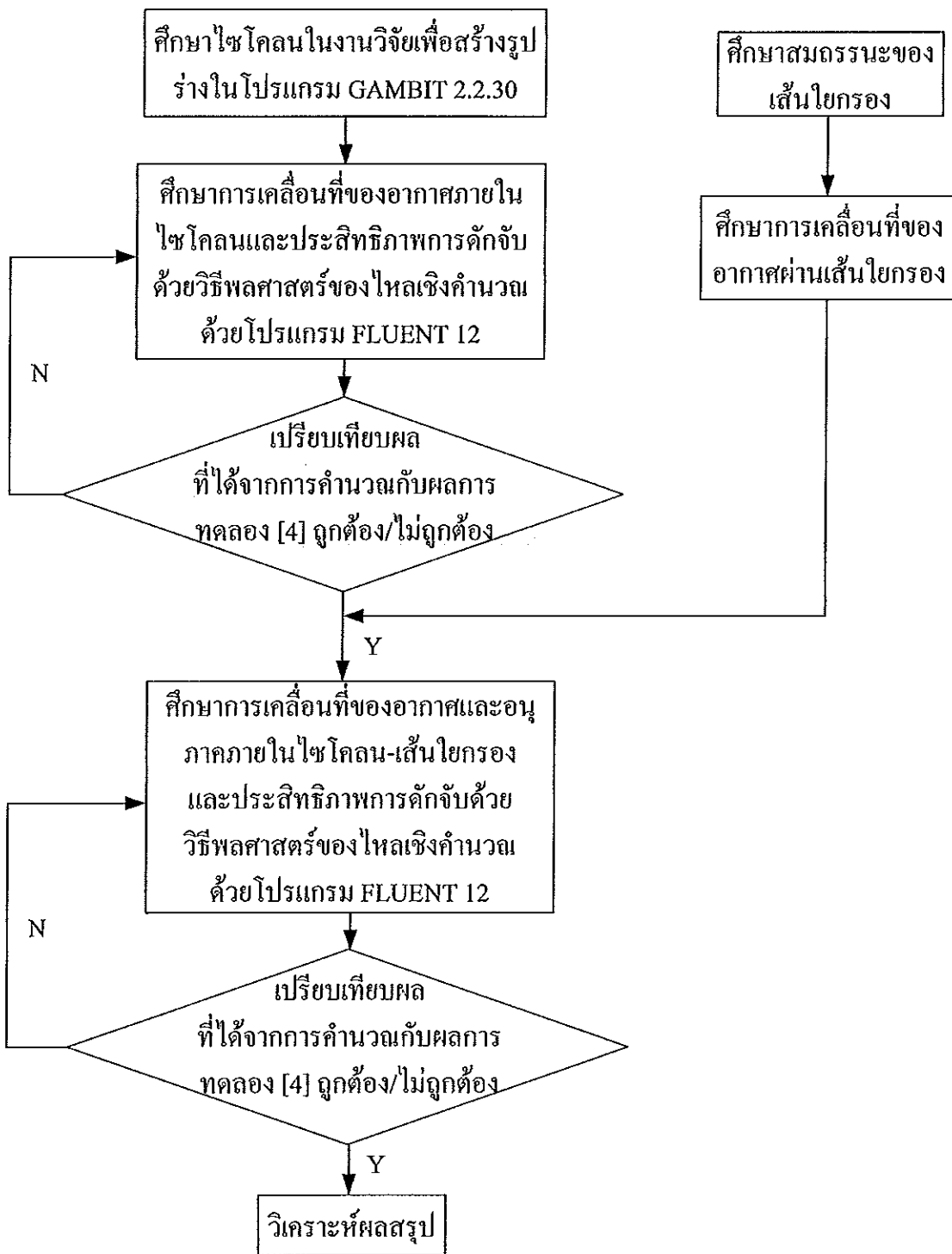
E8200 (2.66 GHz, 6MB L2 Cache, 1333MHz FSB) และคอมพิวเตอร์เครือข่ายกริด (grid computers) จำนวน 6 เครื่อง ประกอบด้วย

- Frontend 1 เครื่อง 2x Intel (R) Xeon (TM) CPU 2.80 GHz 16 KB Cache 2 MB LB Cache, 800 MHz FSB, HT, EM64T RAM 4 GB 8*512 MB DIMM DDR

- Compute Node 4 เครื่อง 2x Intel (R) Xeon (TM) CPU 2.80 GHz 16 KB Cache 2 MB LB Cache, 800 MHz FSB, HT, EM64T RAM 4 GB 8*512 MB DIMM DDR

- Storage Server 1 เครื่อง Intel (R) Xeon (R) X3220 128 KB L1 Cache, 8 MB Cache, 2.40 GHz, Quad Cores, 1066 MHz FSB, EM64T RAM 2 GB 2*1 GB DIMM DDR2 800 MHz

ซึ่งวิธีการทำวิจัยนี้มีลำดับขั้นตอน รายละเอียดของอุปกรณ์และการดำเนินการ แสดงในรูปที่ 4.1

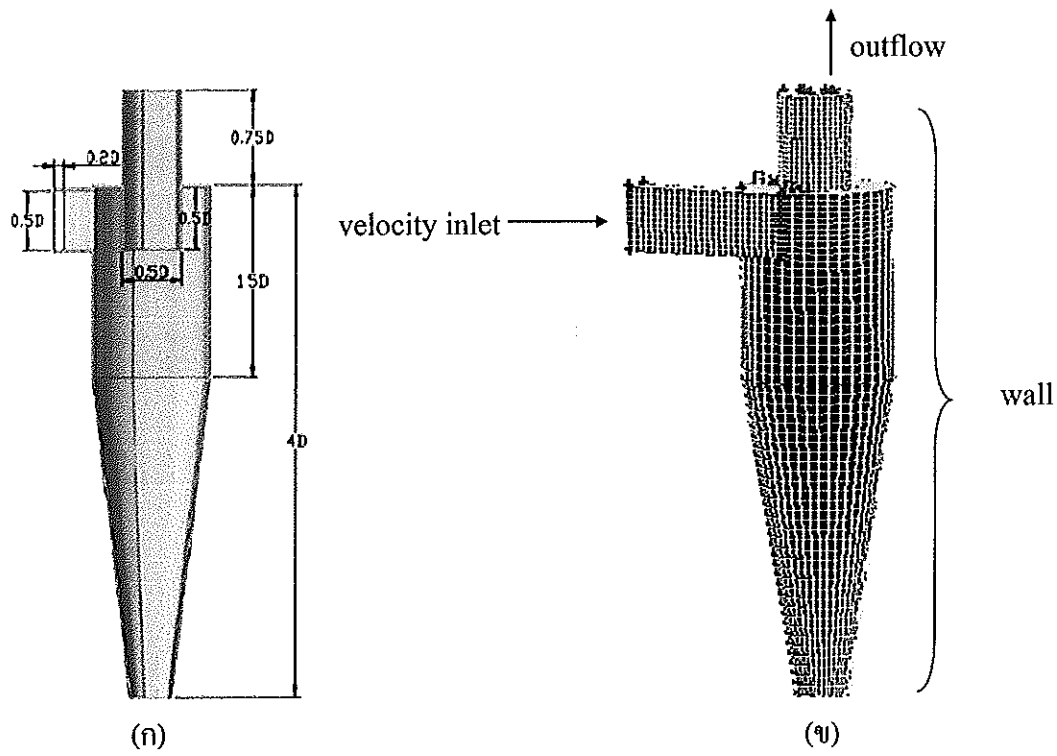


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการวิจัย

4.2 การกำหนดกริดของไซโคลน

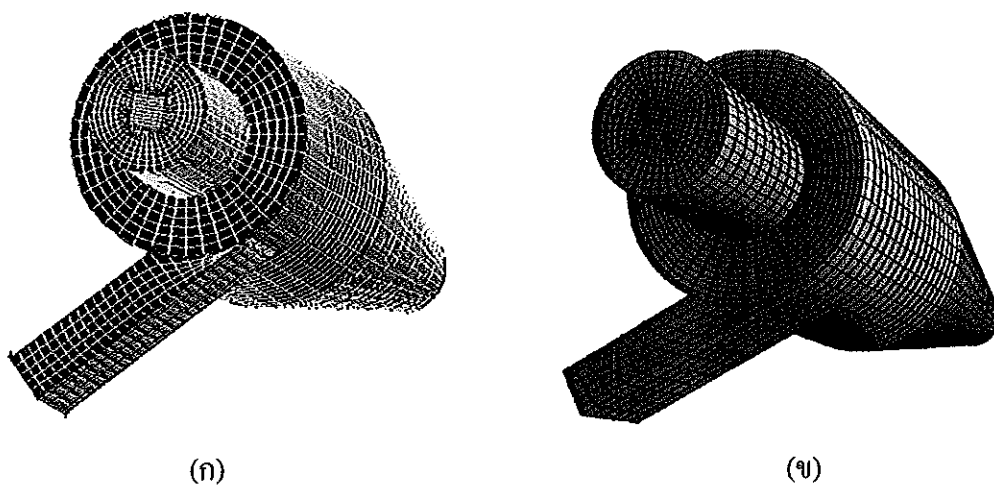
จากการทบทวนเอกสารวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลน พบว่าผลการคำนวณนั้นจะถูกลงสู่ค่าตอบยากมาก ซึ่งเป็นผลมาจากกริดในแบบจำลองของไซโคลนมีการเอียงตัวมาก ทำให้คุณภาพต่ำ ซึ่งวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไซโคลน จำเป็นต้องใช้กริดที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (hexahedron) เพื่อให้มีกริดมีคุณภาพสูง คือกริดนั้นไม่เอียงตัวมากเกินไป ทำให้ผลการคำนวณถูกลงสู่ค่าตอบ และผลที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาไซโคลนตามรูปร่างและขนาดของ Slack et al. [44] ดังรูปที่ 4.2 (ก) เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้อง (verification) ในการกำหนดค่าของเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) โดยทำการเปรียบเทียบผลกับการทดลอง ลักษณะของกริดสำหรับไซโคลนที่ใช้มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ทั้งหมดและทำการจัดเรียงตัวของกริดให้มีระเบียบในแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากคุณภาพของกริดที่ได้มีคุณภาพสูงกว่ารูปร่างของกริดและการเรียงตัวในแบบอื่น ๆ ของแบบจำลองไซโคลน และทำการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสมต่อวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้จำนวน 80,478, 84,015, 89,310, 125,301 และ 163,371 กริด เพื่อเปรียบเทียบกับผลของ Slack et al. [44] ที่มีจำนวน 40,000 กริด ที่เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด อากาศที่ไหลเข้าไปในไซโคลน มีความหนาแน่น 1.225 kg/m^3 มีอัตราการไหล $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยทางเข้าไซโคลนกำหนดให้เป็นความเร็วเฉลี่ย 19.04 m/s และทางออกกำหนดเป็น outflow ดังรูปที่ 4.2 (ข) ซึ่งผลจากการคำนวณจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 5

จากนั้นจึงทำการศึกษาโดยใช้รูปร่างและขนาดไซโคลนในงานวิจัยนี้ ซึ่งเหมือนกับไซโคลนของ Sangkhamanee et al. [4] มีหน้าตัดของท่อทางเข้าเป็นวงกลม เมื่อทำการสร้างแบบจำลองที่หน้าตัดของท่อทางเข้าของไซโคลนเป็นวงกลม แล้วทำการสร้างกริด ซึ่งกริดในแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม (tetrahedron) ทั้งหมด ทำให้คุณภาพของกริดมีคุณภาพต่ำมาก ทำให้การคำนวณถูกลงสู่ค่าตอบยากมาก ในงานวิจัยนี้จึงทำการเปลี่ยนหน้าตัดของท่อทางเข้าของไซโคลนเป็นสี่เหลี่ยม เพื่อการสร้างกริดในแบบจำลองเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ทั้งหมด เพื่อให้ผลการคำนวณถูกลงสู่ค่าตอบง่ายขึ้น ดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1 ซึ่งทำการสร้างกริดให้มีการเรียงตัวเหมือนกับ Slack et al. [44] เนื่องจากมีการเอียงตัวของกริดน้อยที่สุด และคุณภาพของกริดสูงกว่ารูปร่างของกริดในแบบอื่น ๆ



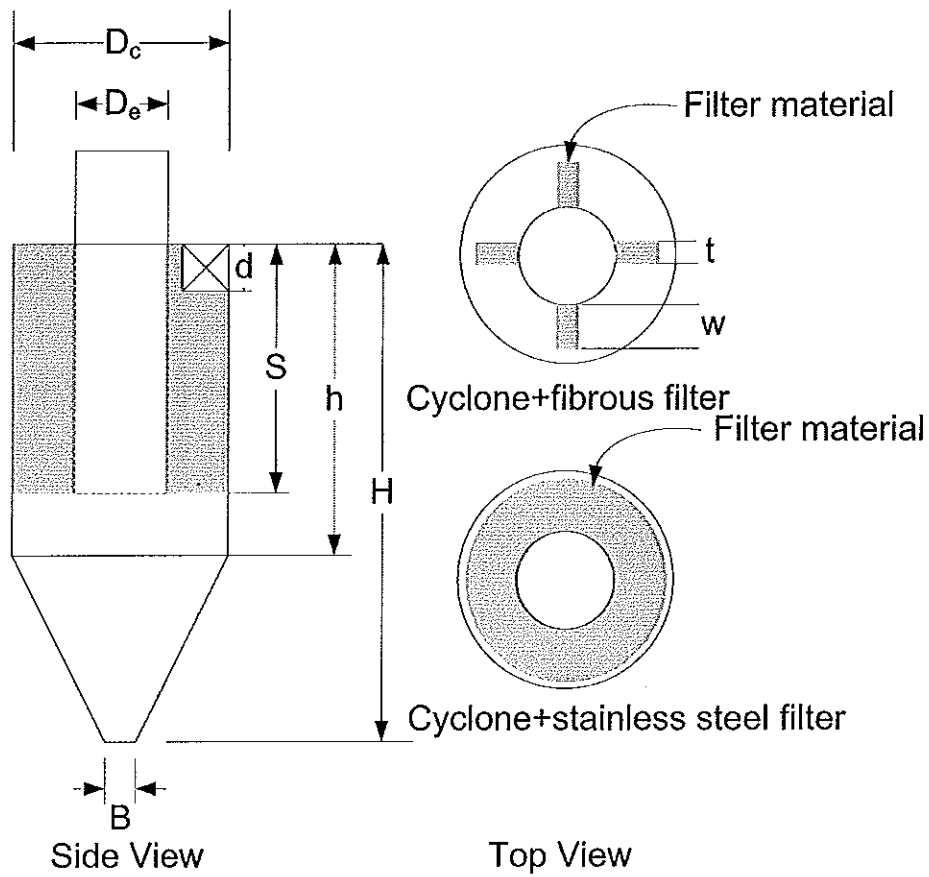
รูปที่ 4.2 ไซโคลนของ Slack et al. [44]

(ก) ขนาดไซโคลนของ Slack et al. [44] (ข) เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณ



รูปที่ 4.3 แบบจำลองไซโคลน

(ก) แบบจำลองที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ (ข) Slack et al. [44]



รูปที่ 4.4 ขนาดและการติดตั้งเส้นใยกรองของไซโคลนในงานวิจัยนี้ [4]

ตารางที่ 4.1 ขนาดของไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย

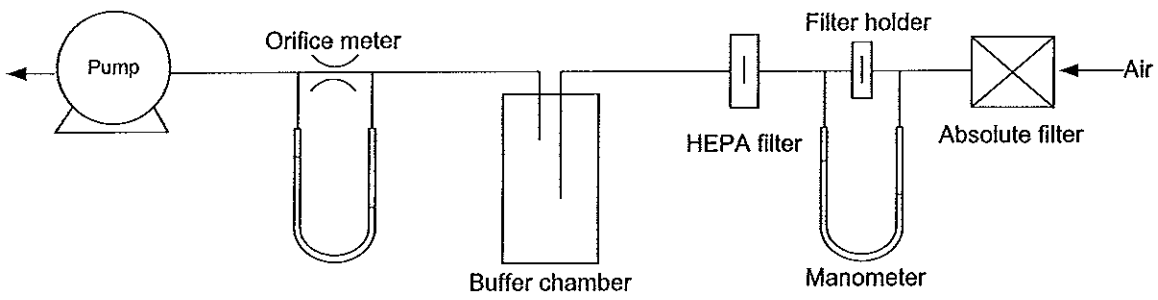
Parameter	Dimension (mm)
D_c	41
D_e	16
d	8
B	6
S	48
h	64
H	109
t	5
w	4, 8

4.3 สมรรถนะเส้นใยกรอง

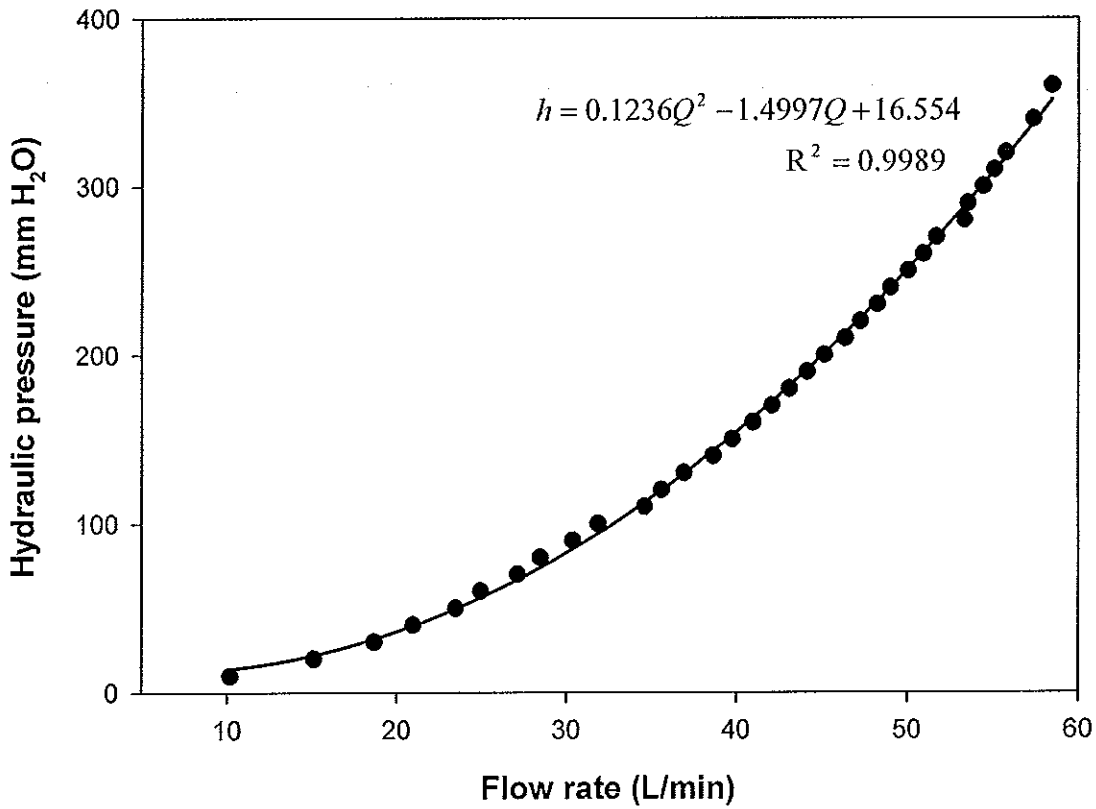
เส้นใยกรองจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคให้กับไซโคลอน โดยการเพิ่มกลไกในการดักจับดังตามรายละเอียดในทฤษฎีบทที่ 2 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งเส้นใยกรอง 2 ชนิด บรรจุนระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลอนและผนังด้านนอกของท่อทางออกไซโคลอน คือ เส้นใยไฟเบอร์ (fibrous filter) และเส้นใยสแตนเลส (stainless steel) ซึ่งทำการติดตั้ง 2 แบบ คือ เส้นใยไฟเบอร์ ติดตั้งเป็นแบบกริบ 4 กริบ มีความยาวของกริบ (w) เท่ากับ 4 mm และ 8 mm ส่วนเส้นใยสแตนเลสบรรจุเต็มช่องว่างมีน้ำหนัก 0.94 g และ 1.83 g ดังแสดงในรูปที่ 4.4

จากการศึกษาสมรรถนะของเส้นใยกรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคให้กับไซโคลอนนั้น ต้องทำการศึกษาคูสมบัติทางกายภาพของเส้นใยกรอง เพื่อประยุกต์เงื่อนไขวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้ในไซโคลอน โดยเส้นใยกรองนั้นเปรียบเสมือนกับวัสดุรูพรุน ซึ่งในการคำนวณความดันของโปรแกรม Fluent 12 จะต้องมีตัวแปรที่ต้องกำหนดลงในเงื่อนไขขอบเขตของวัสดุรูพรุน 2 ค่า คือความหนาแน่นเส้นใยกรอง (packing density) และสัมประสิทธิ์การต้านทานการไหล ซึ่งความหนาแน่นของเส้นใยไฟเบอร์มีค่า 0.0396 และเส้นใยสแตนเลสมีค่า 0.0065 ส่วนสัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลเป็นเงื่อนไขของแบบจำลองในการคำนวณของสมการ โมเมนต์ัมของวัสดุรูพรุนมี 2 ค่า คือ ความต้านทานเชิงความหนืด (viscous resistance, $1/\alpha$) และ ความต้านทานเชิงความเฉื่อย (inertial resistance, C) ซึ่งสามารถคำนวณจากการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 2.74 กับสมการที่ได้จากการ fit curve ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็วน้ำที่ผ่านเส้นใยไฟเบอร์และเส้นใยสแตนเลส ที่ได้จากการทดลอง โดยชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

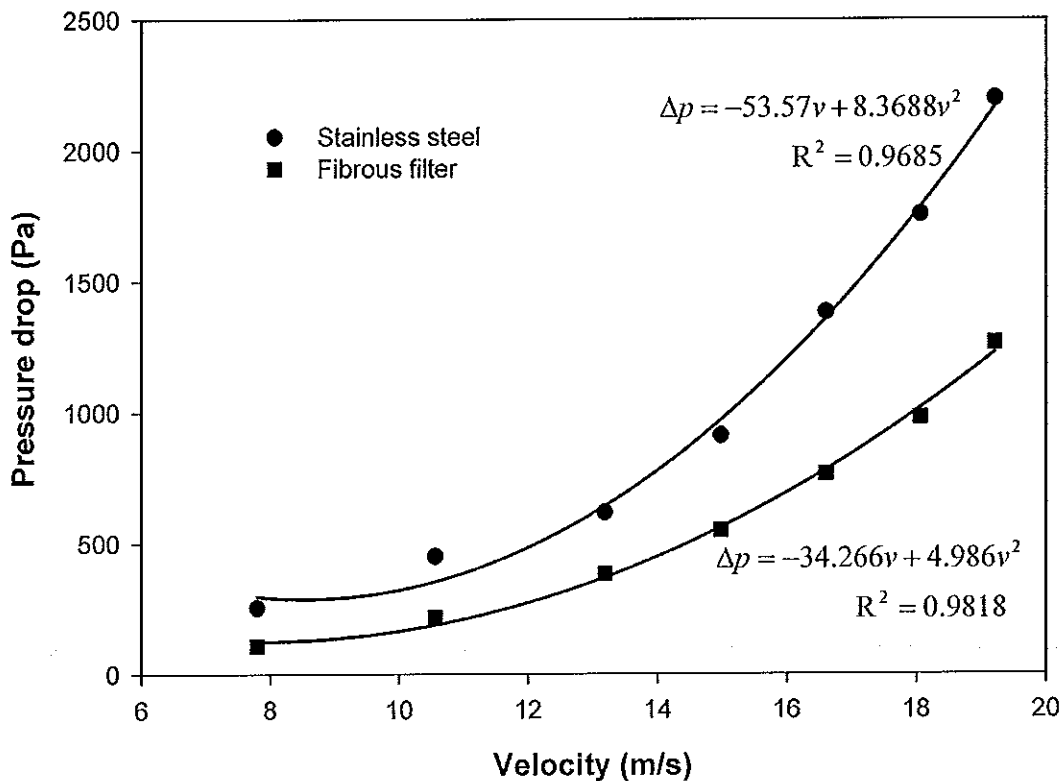
ปั๊มสุญญากาศทำหน้าที่ดูดกระแสอากาศที่ใช้จะผ่าน absolute filter เพื่อให้ให้อากาศนั้นบริสุทธิ์ไม่มีสิ่งเจือปน จากนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านเส้นใยกรองในชุดทดสอบ ซึ่งในชุดทดลองนี้จะทำการวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น จากการอ่านความแตกต่างของระดับน้ำใน manometer รูปตัว U จากนั้นอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ชุดปรับความเสถียรภาพของการไหล (buffer chamber) มาตรการไหลชนิดคอคอด (orifice meter) และปั๊มสุญญากาศออกสู่นอกระบบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศและความดันตกคร่อมมาตรการไหลชนิดคอคอด (orifice meter) หาได้จากการสอบเทียบดังรูปที่ 4.6 เมื่อความแตกต่างระดับน้ำใน manometer (ความดันตกคร่อม) เพิ่มขึ้นอัตราการไหลจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ชุดทดลองหาค่าความดันสูญเสียในการไหลของกระแสอากาศผ่านเส้นใยกรอง



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำ



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็วจนผ่านเส้นใยกรอง

จากนั้นนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียผ่านเส้นใยกรองกับความเร็วดังรูปที่ 4.7 แล้วทำการ fit curve สมการเพื่อหาสัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลของวัสดุพรมดั่งสมการ (4.1) สมการ (4.4) โดยการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการที่ fit curve จากการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

จากสมการที่ (2.74)

$$\Delta p = \left[\frac{\mu}{\alpha} v + C \frac{1}{2} \rho v^2 \right] \Delta n \quad (2.74)$$

และสมการที่ได้จากการ fit curve ของเส้นใยไฟเบอร์ แสดงในรูป 4.7 คือ

$$\Delta p = -34.266v + 4.986v^2 \quad (4.1)$$

เมื่อทำการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ (2.74) กับสมการ (4.1) จะได้

$$\frac{\mu}{\alpha} \Delta n = -34.266 \quad (4.2)$$

และ

$$C \frac{1}{2} \rho \Delta n = 4.986 \quad (4.3)$$

โดยที่ $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$ และความหนาของเส้นใยไฟเบอร์แต่ละแกนแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหนาของเส้นใยกรองแต่ละแกนภายในไซโคลน

แกน	Δn (m)		
	เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm	เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm	เส้นใยสแตนเลส
x	0.005	0.005	0.01025
y	0.004	0.008	0.01025
z	0.064	0.064	0.06400

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (4.2) และสมการ (4.3) จะได้ค่าความต้านทานเชิงความหนืดและความต้านทานเชิงความเฉื่อยของเส้นใยไฟเบอร์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลของเส้นใยไฟเบอร์

Direction	Fibrous Filter; 4 mm		Fibrous Filter; 8 mm.	
	Viscous	Inertial	Viscous	Inertial
	Resistance	Resistance	Resistance	Resistance
	$1/\alpha$ (1/m ²)	C (1/m)	$1/\alpha$ (1/m ²)	C (1/m)
1(y)	3.83e+08	1628.0816	3.83e+08	1628.0816
2(x)	4.79e+08	2035.1020	2.39e+08	1017.5510
3(z)	2.99e+07	127.1938	2.99e+07	127.1938

ในลักษณะเดียวกันสมการที่ได้จากการ fit curve ของเส้นไฮสแตนเลส แสดงในรูปที่ 4.7

$$\Delta p = -53.57v + 8.3688v^2 \quad (4.4)$$

เมื่อทำการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ (2.74) กับสมการ (4.4) จะได้

$$\frac{\mu}{\alpha} \Delta n = -53.57 \quad (4.5)$$

และ

$$C \frac{1}{2} \rho \Delta n = 8.3688 \quad (4.6)$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (4.5) และ (4.6) จะได้ค่าความต้านทานเชิงความหนืดและความต้านทานเชิงความเฉื่อยของเส้นไฮสแตนเลส 0.94 g ดังตารางที่ 4.4 ส่วนเส้นไฮสแตนเลส 1.83 g มีความหนาแน่นของเส้นไฮสแตนเลสเป็นสองเท่าของเส้นไฮสแตนเลส 0.94 g ดังนั้นค่าความต้านทานเชิงความหนืดและความต้านทานเชิงความเฉื่อยของเส้นไฮสแตนเลส 1.83 g ในแต่ละแกนจึงมีค่าเป็นสองเท่าของเส้นไฮสแตนเลส 0.94 g ดังตารางที่ 4.4 จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลที่ได้ใส่ในโปรแกรมเพื่อเป็นเงื่อนไขในการคำนวณ แล้วจึงนำผลจากการคำนวณความดันสูญเสียในไฮดรอลิก-เส้นไฮสแตนเลสเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลของเส้นไฮสแตนเลส

Direction	Stainless steel; 0.94 g		Stainless steel; 1.83 g	
	Viscous Resistance	Inertial Resistance	Viscous Resistance	Inertial Resistance
	$1/\alpha$ (1/m ³)	C (1/m)	$1/\alpha$ (1/m ²)	C (1/m)
1(y)	1.50e+08	683.1674	2.99e+08	1366.3348
2(x)	1.50e+08	683.1674	2.99e+08	1366.3348
3(z)	4.68e+07	213.4898	9.36e+07	426.9796

4.4 การเคลื่อนที่ของกระแสดอากาศภายในไซโคลน

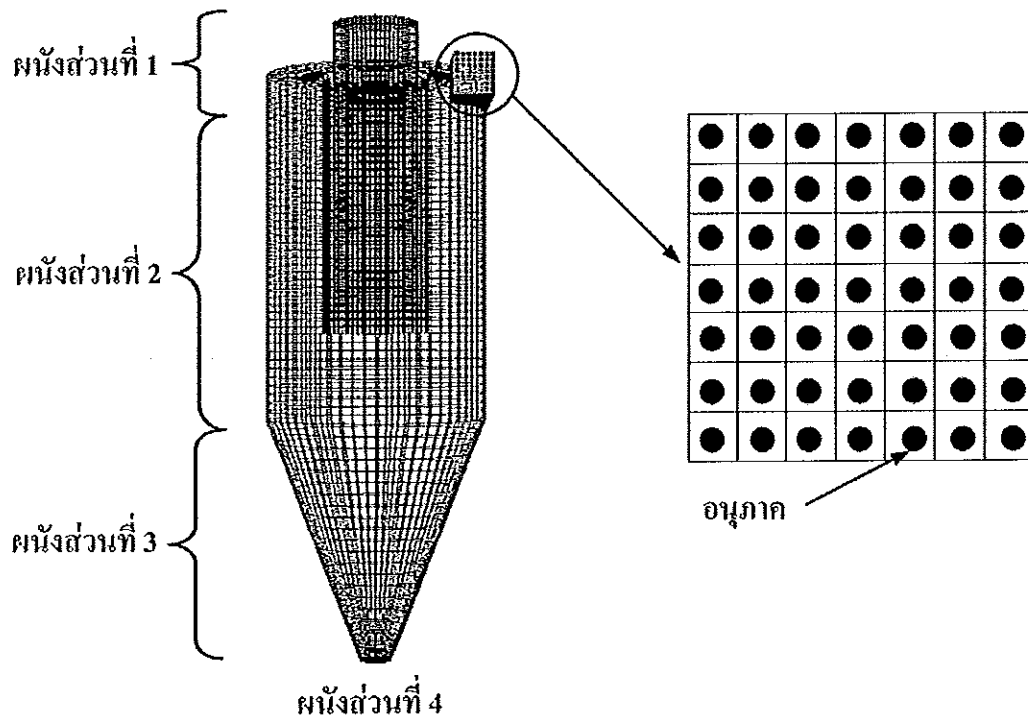
ในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลองการไหลในไซโคลนโดยการศึกษาการเคลื่อนที่ของกระแสดอากาศภายในไซโคลนตามขนาดและรูปร่างของ Sangkhamanee et al. [4] ได้ทำการศึกษาความดันสูญเสียที่ความเร็วต่าง ๆ ที่จำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีความเร็ว 3.32, 6.63, 9.95, 13.27, 16.59 และ 19.90 m/s [4] และมีจำนวนกริด 52,682, 67,438, 83,454 และ 99,470 กริด และทำการศึกษากระจายความเร็วในไซโคลนที่เป็นปัจจัยในการแยกอนุภาคออกจากกระแสดอากาศ โดยความเร็วที่ทำการศึกษานั้นคือ ความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity) และความเร็วในแนวแกน (axial velocity) ที่ระนาบต่าง ๆ ในไซโคลน

4.5 การเคลื่อนที่ของกระแสดอากาศและอนุภาคภายในไซโคลน

การศึกษาคalculation การเคลื่อนที่ของกระแสดอากาศและอนุภาคภายในไซโคลนด้วยโปรแกรม Fluent 12 นั้นใช้รูปแบบ Discrete Phase Model (DPM) โดยกำหนดเงื่อนไข DPM ที่ทางเข้าทางออก และผนังของไซโคลน ซึ่งทางเข้าและทางออกของไซโคลนจะกำหนดเป็นเงื่อนไข escape ซึ่งหมายถึงเป็นผนังที่อนุภาคสามารถหลุดออกจากผิว และผนังของไซโคลนในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งผนังในส่วนที่ 1-3 กำหนดคุณสมบัติเป็น reflect หมายถึงมีการสะท้อนของอนุภาคที่ผนัง โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนนั้นแสดงดังตารางที่ 4.5 และผนังในส่วนที่ 4 กำหนดเป็นเงื่อนไข trap หมายถึงเป็นผนังที่อนุภาคถูกดักจับที่ผิว โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาขนาดอนุภาค 3 ขนาด คือ 0.3, 0.5 และ 1 μm [4] ที่ความเร็ว 13.27 และ 19.90 m/s โดยทำการปล่อยอนุภาคตามเวลาที่กำหนด จำนวนอนุภาค 14,749 อนุภาค อนุภาคมีความหนาแน่น 1,050 kg/m^3 ซึ่งเวลาแต่ละช่วงที่ทำการปล่อยมีค่า $\Delta t = 0.0001$ s และแต่ละช่วงเวลาทำการปล่อยอนุภาค 49 อนุภาคตามจำนวนช่องของกริดที่บริเวณทางเข้าของไซโคลนดังรูปที่ 4.8 จนครบ 14,749 อนุภาค จึงหยุดทำการปล่อยอนุภาค สาเหตุที่ใช้จำนวนเท่านี้เพื่อไม่ให้เป็นการคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของคอมพิวเตอร์จนเกินไป ซึ่งการคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Lagrangian ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไซโคลนและรอจนอนุภาคไม่มีการไหลภายในไซโคลน จึงทำการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับของไซโคลนจาก

$$\eta = 1 - \frac{n_{outlet}}{n_{inlet}} \quad (4.7)$$

โดยที่ n_{outlet} คือจำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ออกจากไซโคลน และ n_{inlet} คือจำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าในไซโคลน



รูปที่ 4.8 เงื่อนไขผนังแต่ละส่วนและทางเข้าในการปล่อยอนุภาค

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขขอบเขตของ Discrete Phase Model (DPM)

บริเวณ	เงื่อนไขขอบเขต
ทางเข้า	Escape
ทางออก	Escape
ผนังส่วนที่ 1	Reflect (1-0.9)
ผนังส่วนที่ 2	Reflect (0.7-0.4)
ผนังส่วนที่ 3	Reflect (0.4-0.05)
ผนังส่วนที่ 4	Trap

4.6 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำอากาศภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง

เมื่อทำการคำนวณค่าความต้านทานเชิงความหนืด และความต้านทานเชิงความเฉื่อยซึ่งเป็นเงื่อนไขขอบเขตของโปรแกรมในการคำนวณดังหัวข้อที่ 4.3 แล้วจึงทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำอากาศภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง โดยศึกษาความดันสูญเสียที่ความเร็ว 3.32, 6.63, 9.95, 13.27, 16.59 และ 19.90 m/s [4] และศึกษากระจายความเร็วในไซโคลนที่เป็นปัจจัยในการแยกอนุภาคออกจากกระแสน้ำอากาศ โดยความเร็วที่ทำการศึกษานั้นคือ ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกน ที่ระนาบต่าง ๆ ในไซโคลน-เส้นใยกรอง

4.7 การศึกษาการไหลของอนุภาคภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง

เนื่องจากเส้นใยกรองในไซโคลนของงานวิจัยนี้กำหนดเส้นใยกรองเปรียบเสมือนวัสดุพรุน (porous media) ซึ่งไม่สามารถกำหนดการเรียงตัวของวัสดุพรุนเหมือนกับเส้นใยกรองของจริงในไซโคลน และเงื่อนไขของวัสดุพรุนในโปรแกรมนั้นไม่สามารถตั้งค่าให้ทำการดักจับอนุภาคได้เมื่อมีอนุภาคไหลมาที่กระแสน้ำอากาศแล้วชนกับเส้นใยกรอง ทำให้ไม่สามารถคำนวณประสิทธิภาพการดักจับได้ ในหัวข้อนี้จึงได้ศึกษาผลการจำลองการไหลของกระแสน้ำอากาศและอนุภาคผ่านไซโคลน-เส้นใยกรอง โดยปล่อยอนุภาคเข้าไปในไซโคลน-เส้นใยกรองอย่างต่อเนื่องจนจำนวนอนุภาคที่อยู่ในไซโคลน-เส้นใยกรองมีจำนวนคงที่ ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตของ DPM เหมือนกับหัวข้อ 4.5 แล้วทำการวิเคราะห์ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกน ที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s และ 19.90 m/s [4] ซึ่งความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนทั้งสองนี้เป็นปัจจัยในการแยกอนุภาคออกจากกระแสน้ำอากาศ จากนั้นทำการเปรียบเทียบการไหลภายในไซโคลน-เส้นใยกรองที่มีกระแสน้ำอากาศเพียงอย่างเดียวกับการไหลภายในไซโคลน-เส้นใยกรองที่มีกระแสน้ำอากาศกับอนุภาคผสมกัน เพื่อนำผลจากการจำลองมาวิเคราะห์และอธิบายปรากฏการณ์การไหลในไซโคลน-เส้นใยกรองเพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลองประสิทธิภาพการดักจับในไซโคลน-เส้นใยกรองของ Sangkhamanee et al. [4]

บทที่ 5

ผลการจำลองและการวิจารณ์ผลของไซโคลน

ในบทนี้แสดงผลการจำลองการไหลของกระแสอากาศในไซโคลนเปล่า เพื่อศึกษาความแม่นยำของวิธีการคำนวณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วยผลของจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ ความดันสูญเสียภายในไซโคลน การกระจายความดันในไซโคลน รวมทั้งประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลน การเคลื่อนที่ของกระแสอากาศและอนุภาคภายในไซโคลน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ผลของจำนวนกริดต่อความแม่นยำในการคำนวณ

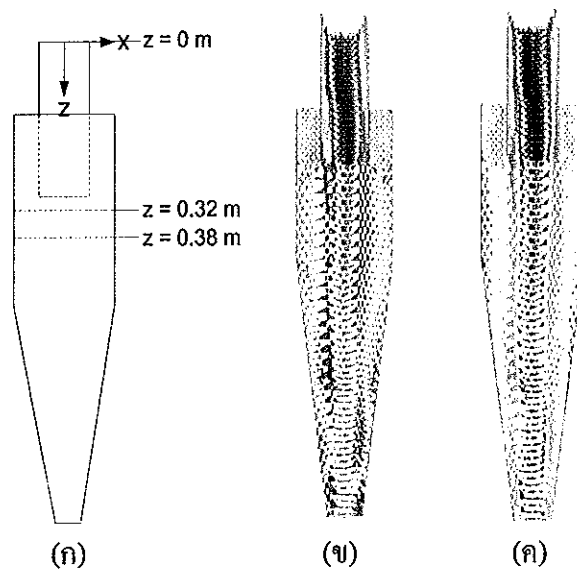
ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลการจำลองในงานวิจัยนี้ โดยใช้ขนาดไซโคลนของ Slack et al. [44] ดังรูปที่ 4.2 ส่วนลักษณะกริดแสดงในรูปที่ 4.3 เทียบกับผลการจำลองและผลการทดลองของ Slack et al. [44] เพื่อพิสูจน์ความแม่นยำของการใช้จำนวนกริด (grid verification) การจำลองจะใช้ความเร็วทางเข้า 19.04 m/s จำนวนกริดของงานนี้ คือ 80,478, 84,015, 89,310, 125,301 และ 163,371 กริด ส่วนการจำลองของ Slack et al. [44] ใช้จำนวนกริดเท่ากับ 40,000 กริด

จากผลการจำลองการไหลของกระแสอากาศในไซโคลนได้แบ่งผลออกเป็น 2 ส่วนคือ ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนในไซโคลนที่ตำแหน่ง $z = 0.32$ m และ $z = 0.38$ m ดังรูปที่ 5.1 (ก) ซึ่งมีรูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วแนวแกนดังรูปที่ 5.1 (ข) และ (ค) จากนั้นนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองและผลการทดลองโดยการคำนวณค่าเบี่ยงเบนจาก

$$\frac{\sum_{i=1}^N |V_{i,cal} - V_{i,exp}|}{N} \times 100 \quad (5.1)$$

เมื่อ V_{cal} คือความเร็วที่ได้จากการคำนวณ V_{exp} คือความเร็วที่ได้จากการทดลอง N คือจำนวนของข้อมูล จากการเพิ่มจำนวนกริดจาก 80,478 เป็น 163,371 กริด แล้วคำนวณค่าความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกน ที่ตำแหน่ง $z = 0.32$ และ $z = 0.38$ m พบว่า ที่จำนวนกริด 80,478 กริด ให้ผลการจำลองเหมือนกับจำนวนกริดที่ 84,015, 89,310, 125,301 และ 163,371 กริด แสดงว่า

จำนวนกริด 80,478 กริด มีความเหมาะสมและจำนวนเพียงพอในการจำลอง จึงใช้ผลที่จำนวนกริดจำนวนนี้เปรียบเทียบกับผลการจำลองและผลการทดลองของ Slack et al. [44] ที่ตำแหน่ง $z = 0.32$ m ผลการจำลองความเร็วในแนวสัมผัสของ Slack et al. [44] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองเฉลี่ย 67.2% ความเร็วในแนวสัมผัสของงานวิจัยนี้มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองเฉลี่ย 25.0% ดังรูปที่ 5.2 (ก) และความเร็วในแนวแกนจากผลของ Slack et al. [44] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองเฉลี่ย 88.2% ความเร็วในแนวแกนของงานวิจัยนี้ที่มีความเบี่ยงเบนเฉลี่ย 86.5% ดังรูปที่ 5.2 (ข)

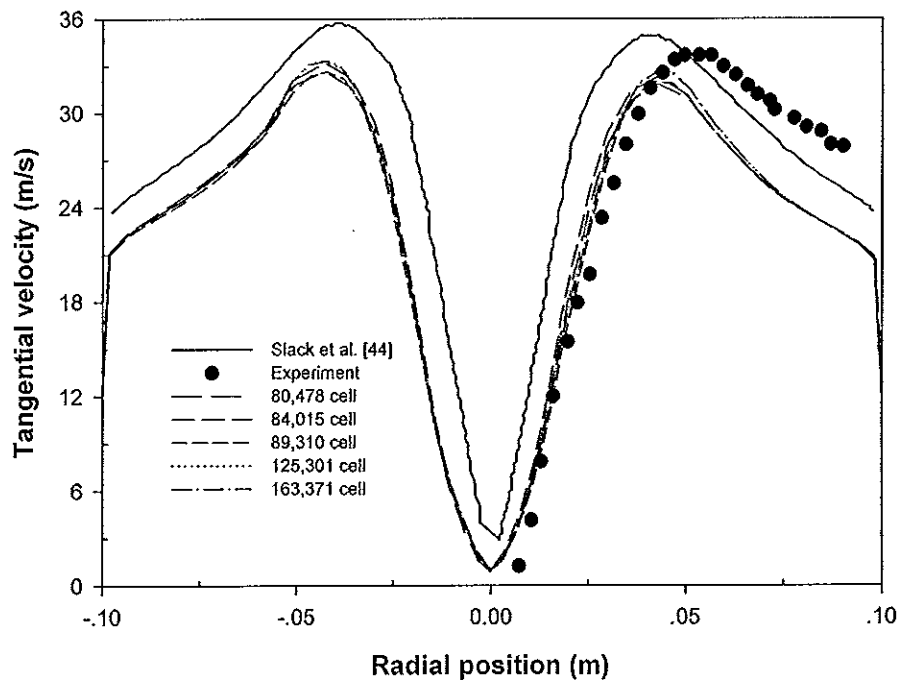


รูปที่ 5.1 ตำแหน่งความเร็ว (ก) ตำแหน่งที่นำผลมาเปรียบเทียบ
(ข) โปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัส (ค) โปรไฟล์ความเร็วในแนวแกน

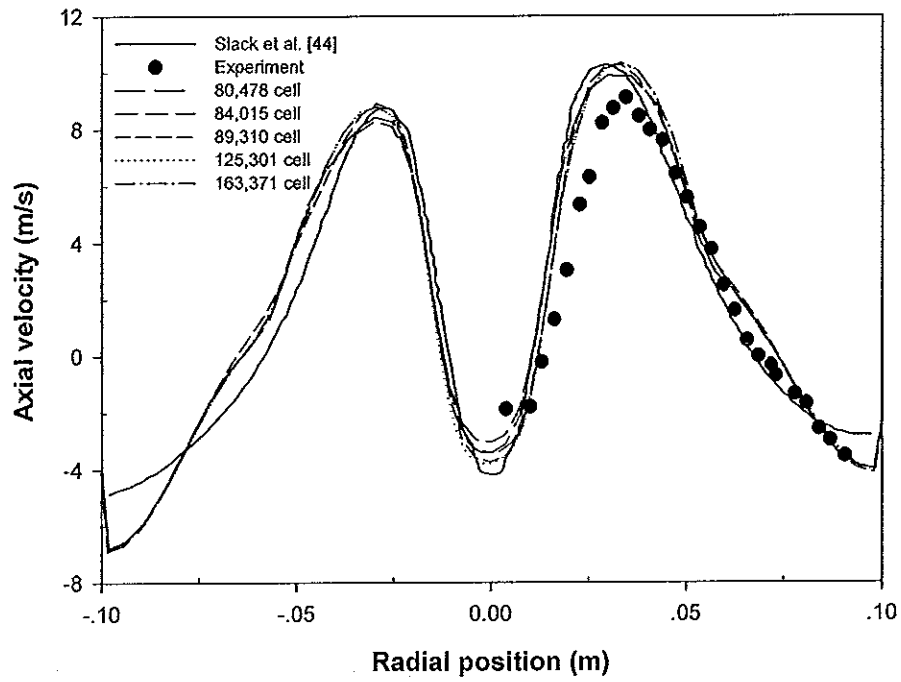
ส่วนที่ตำแหน่ง $z = 0.38$ m ผลการจำลองความเร็วในแนวสัมผัสของ Slack et al. [44] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองเฉลี่ย 18.9% ส่วนความเร็วในแนวสัมผัสของงานวิจัยนี้มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองเฉลี่ย 12.5% ดังรูปที่ 5.3 (ก) และความเร็วในแนวแกนจาก Slack et al. [44] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองเฉลี่ย 78.3% ส่วนความเร็วในแนวแกนของงานวิจัยนี้มีความเบี่ยงเบนเฉลี่ย 151.1% ดังรูปที่ 5.3 (ข) ซึ่งผลการจำลองของงานวิจัยนี้ความเร็วในแนวสัมผัสนั้นใกล้เคียงการทดลองมากกว่าผลการจำลองของ Slack et al. [44] ทั้งตำแหน่ง $z = 0.32$ m และ $z = 0.38$ m และผลการคำนวณความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่ง $z = 0.32$ m มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าผลการคำนวณของ Slack et al. [44] อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากผลของคุณภาพและจำนวนของกริดในงานวิจัยนี้มากกว่าของ

Slack et al. [44] ซึ่งคุณภาพของกริดนั้นเป็นการบอกถึงการเรียงตัวและการเชื่อมตัวของกริดในแบบจำลอง โดยโครงสร้างของกริดรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (hexahedron) ทำให้การคำนวณในรูปของเมตริกซ์ง่ายขึ้นเพราะสามารถอ้างอิงจากพิกัดฉากง่ายขึ้น และกริดเป็นตัวแทนย่อย ๆ ของแบบจำลองที่ถูกคำนวณผ่านสมการควบคุม โดยแต่ละช่วงในแบบจำลองความละเอียดของกริดก็มีผลในการคำนวณ และบางช่วงอาจไม่จำเป็นต้องมีความละเอียดมากผลการคำนวณที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ดังนั้นจำนวนและการเรียงตัวของกริดส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณคำนวณ

ส่วนที่ตำแหน่ง $z = 0.38$ ผลความเร็วในแนวแกนของงานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองน้อยกว่า Slack et al. [44] เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้พยายามทำให้กริดมีคุณภาพสูงกว่า 70% ของจำนวนกริดทั้งหมด จึงส่งผลให้การเรียงตัวของกริดในบางช่วงของแบบจำลองมีจำนวนกริดไม่สม่ำเสมอ โดยบางช่วงในแบบจำลองในแนวรัศมีนั้นอาจมีจำนวนกริดมาก และบางช่วงในบางแบบจำลองในแนวแกนอาจมีจำนวนกริดน้อย จึงทำให้ผลการจำลองในแนวแกนที่ได้ออกมานั้นมีค่าห่างจากผลการการทดลองมากกว่าผลการจำลองในแนวรัศมี และส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากความผิดพลาดของการทดลองด้วย ดังรูปที่ 5.3 (ก) ที่ตำแหน่งแนวรัศมีช่วง 0.025-0.04 m

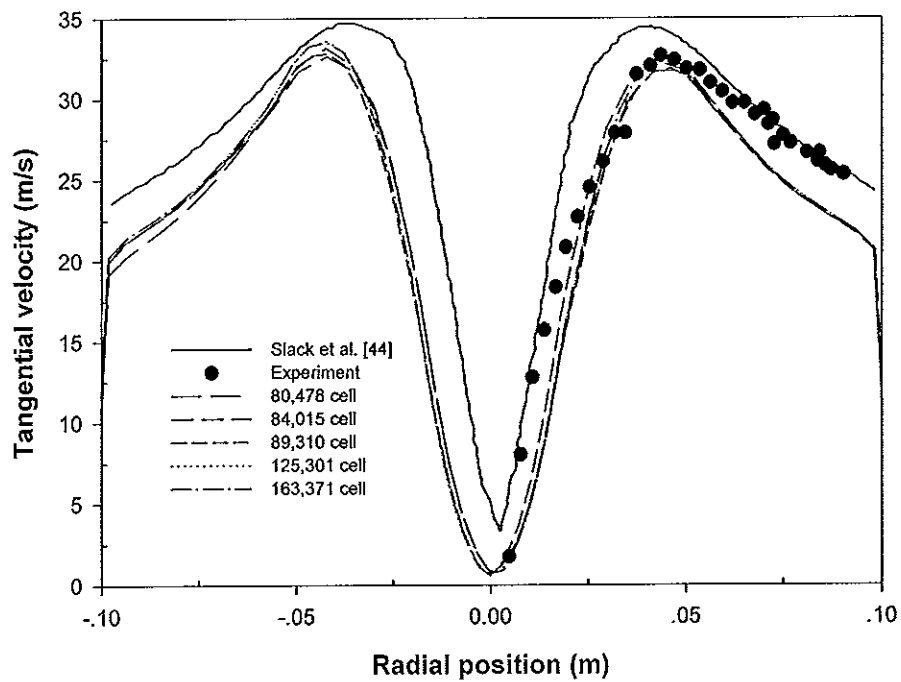


(ก)

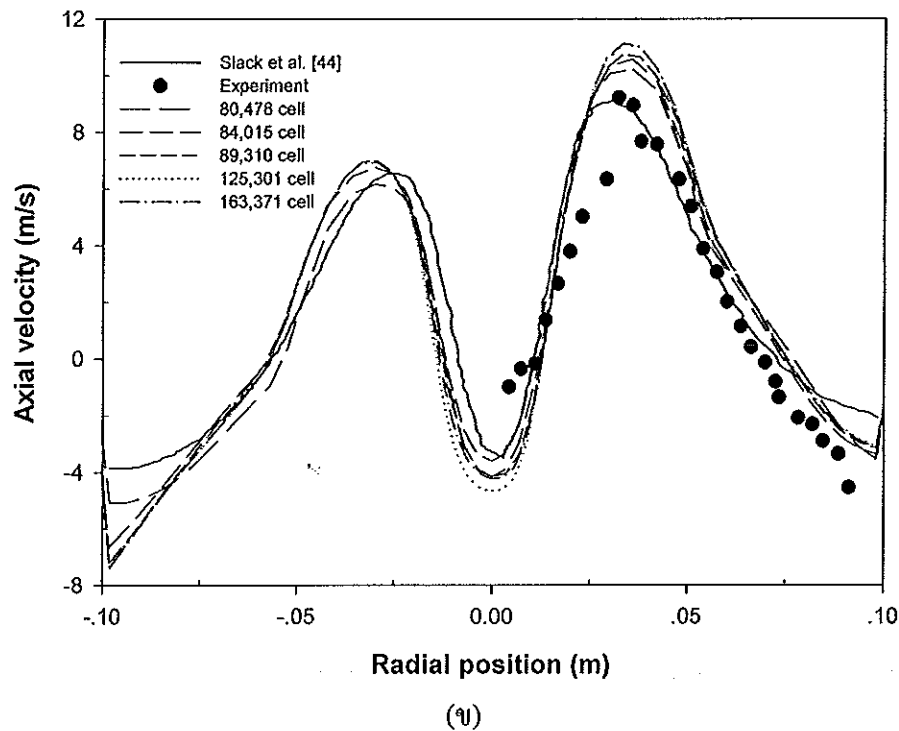


(ข)

รูปที่ 5.2 โปรไฟล์ความเร็วตำแหน่ง $z = 0.32$ m.
 (ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน



(ก)

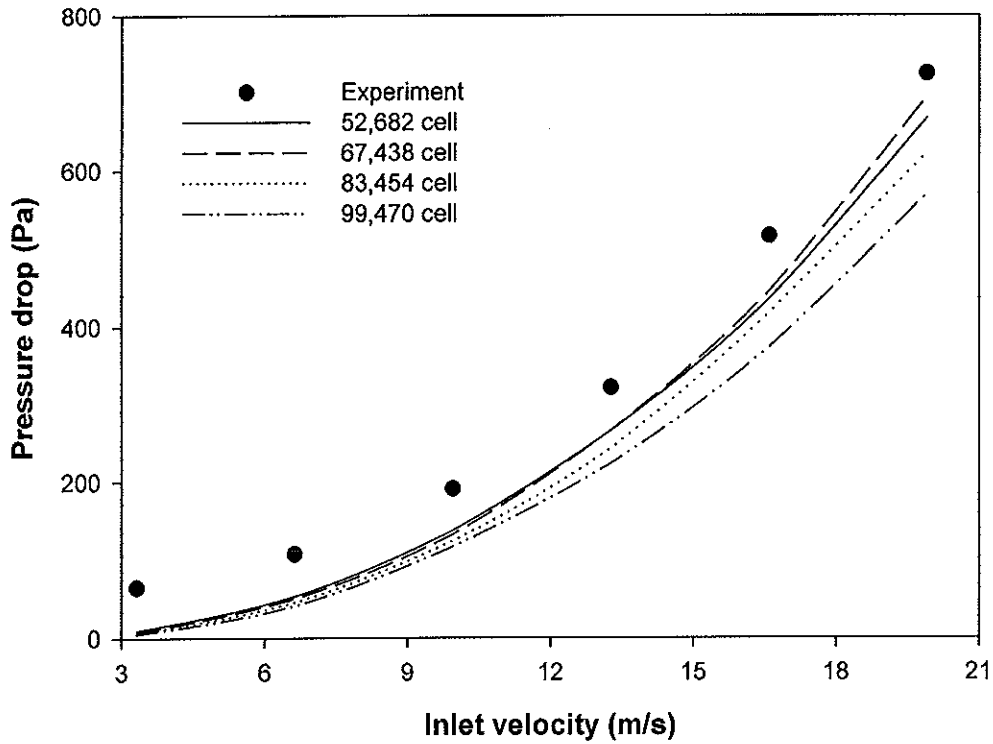


รูปที่ 5.3 โปรไฟล์ความเร็วตำแหน่ง $z = 0.38$ m.
(ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน

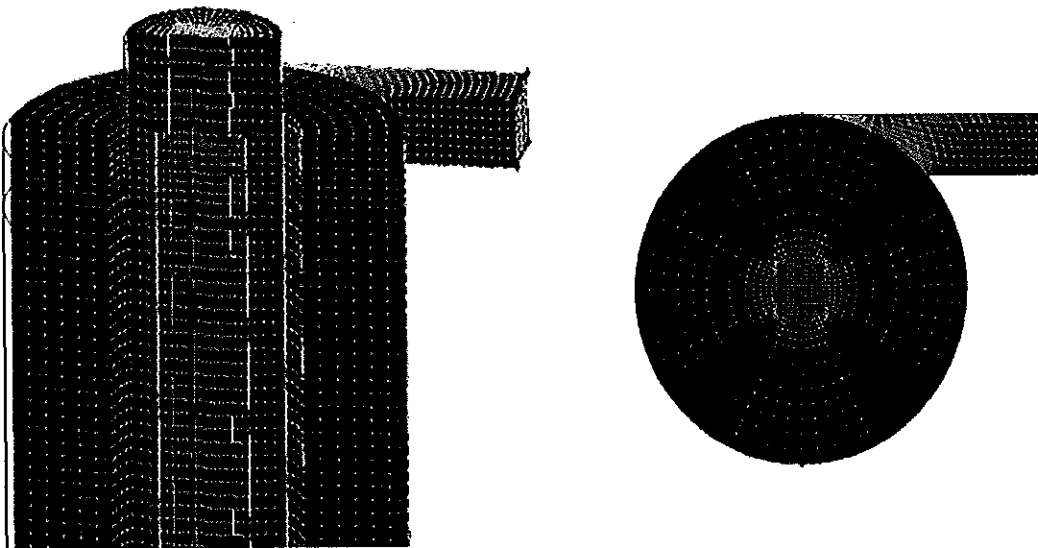
5.2 ความดันสูญเสียและการกระจายความดันในไซโคลน

ในหัวข้อนี้เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ [4] โดยใช้ขนาดของไซโคลน ดังรูปที่ 4.4 โดยศึกษาผลของจำนวนกริดต่อความดันสูญเสียในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 3.32, 6.63, 9.95, 13.27, 16.59 และ 19.90 m/s [4] และที่จำนวนกริด 52,682, 67,438, 83,454 และ 99,470 กริด ผลแสดงในรูปที่ 5.4 พบว่าแนวโน้มของความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการจำลองของไซโคลนในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกับการทดลอง โดยที่จำนวนกริดที่ 67,438 ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าที่จำนวนกริด 52,628, 83,454 และ 99,470 กริด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจำนวนกริดยิ่งมากจะทำให้ผลการคำนวณนั้นใกล้เคียงกับการทดลอง ในการจำลองนี้เมื่อเพิ่มจำนวนกริดผลการจำลองจะใกล้เคียงกับการทดลองจนถึงค่าหนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนกริดจะทำให้ผลต่างจากการทดลองมากขึ้น เป็นผลมาจากเมื่อจำนวนกริดมากเกินไปอาจจะทำให้การเรียงตัวของกริดภายในแบบจำลองเกิดการเอียงตัวมาก จึงทำให้คุณภาพกริดนั้นมีคุณภาพด้อยกว่าจำนวนกริดที่ 67,438 กริด ดังรูปที่ 5.5 ส่วนกรณี 52,628 กริด อาจมีจำนวนกริดน้อยเกินไปจึงทำให้ผลการคำนวณต่างจากผลการทดลอง

ค่อนข้างมาก และในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกใช้จำนวนกริดที่ 67,438 ในการจำลองในกรณีต่อไป

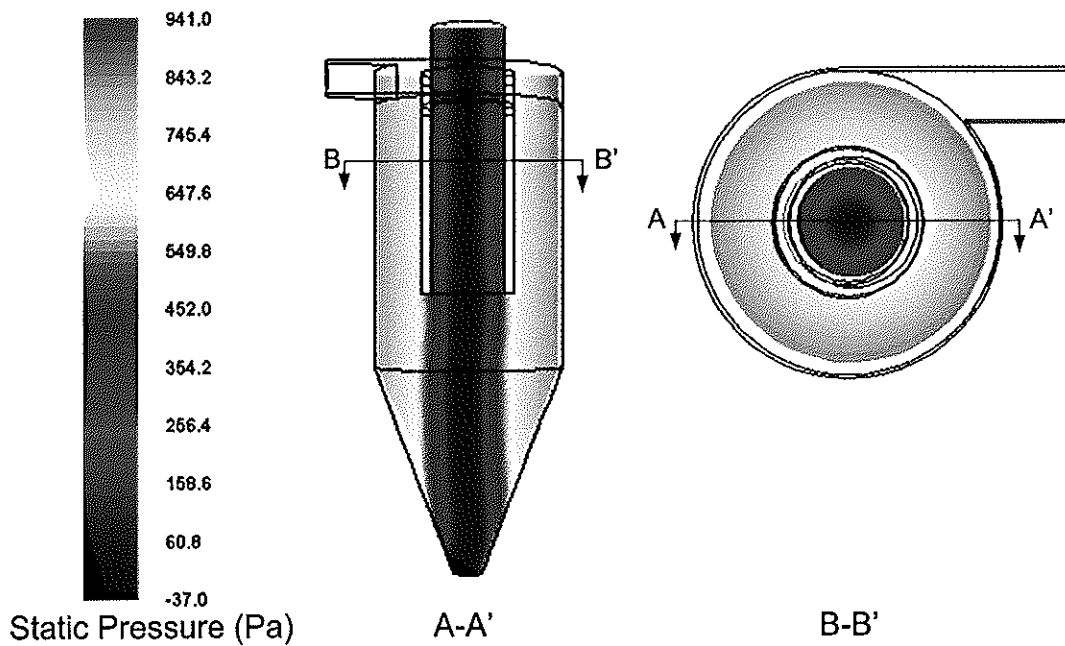


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็วจำนวนกริดต่างๆ



รูปที่ 5.5 การเรียงตัวของกริดและคุณภาพของกริดในแบบจำลองไซโคลน

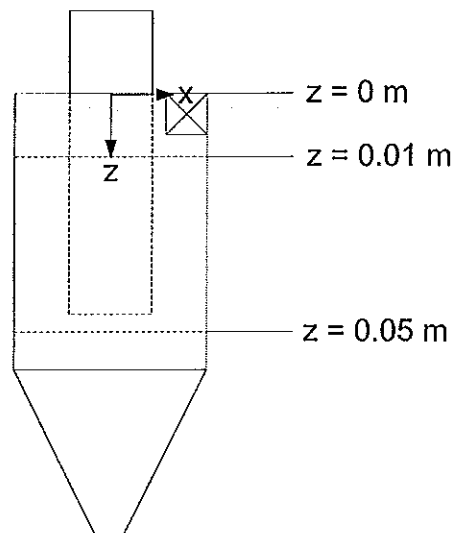
จากผลการจำลองของความดันในไซโคลนพบว่ารูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็ว 19.90 m/s ที่บริเวณใกล้ผนังไซโคลนจะมีค่าสูงกว่าความดันที่บริเวณแกนกลางดังรูปที่ 5.6 ซึ่งการกระจายตัวของความดันมีลักษณะดังกล่าวเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหลภายในไซโคลนที่มีลักษณะหมุนวนเป็นเกลียวไปตามผนัง ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขึ้นภายในไซโคลนส่งผลให้อุณหภูมิภายในไซโคลนมีทิศทางการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณแกนกลางของไซโคลน ซึ่งจากผลของแรงเหวี่ยงภายในไซโคลนทำให้อุณหภูมิที่มีขนาดใหญ่จะถูกเหวี่ยงออกไปไกลกว่าอุณหภูมิที่มีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังส่งผลทำให้ความแตกต่างของค่าความดันในแนวแกนรัศมีมีมากกว่าในแนวแกนของไซโคลนอีกด้วย ซึ่งรูปแบบการกระจายตัวของความดันที่ความเร็วทางเข้าอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) จะมีลักษณะเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ แต่ได้แสดงในภาคผนวก ก โดยค่าความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลนมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลนก็จะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย



รูปที่ 5.6 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s

5.3 ความเร็วในไซโคลน

ในหัวข้อนี้เป็นผลการจำลองความเร็วในไซโคลน [4] ซึ่งในการจำลองใช้ขนาดของไซโคลน ดังรูปที่ 4.4 ทำการศึกษาความเร็วในแนวสัมผัสและในแนวแกน เนื่องจากความเร็วทั้งสองนี้เป็นปัจจัยในการแยกอนุภาคออกจากกระแสอากาศที่บดถึงสมรรถนะของไซโคลน โดยจะแสดงผลการจำลองความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกน ณ ตำแหน่งที่ $z = 0.01$ และ $z = 0.05$ m ดังรูปที่ 5.7 เนื่องจากในการวิเคราะห์ความเร็วในไซโคลน-เส้นใยกรองนั้น ทั้งสองตำแหน่งนี้จะป็นตำแหน่งที่มีเส้นใยกรองและไม่มีเส้นใยกรองเพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน จึงเลือกทั้งสองตำแหน่งนี้มาทำการวิเคราะห์

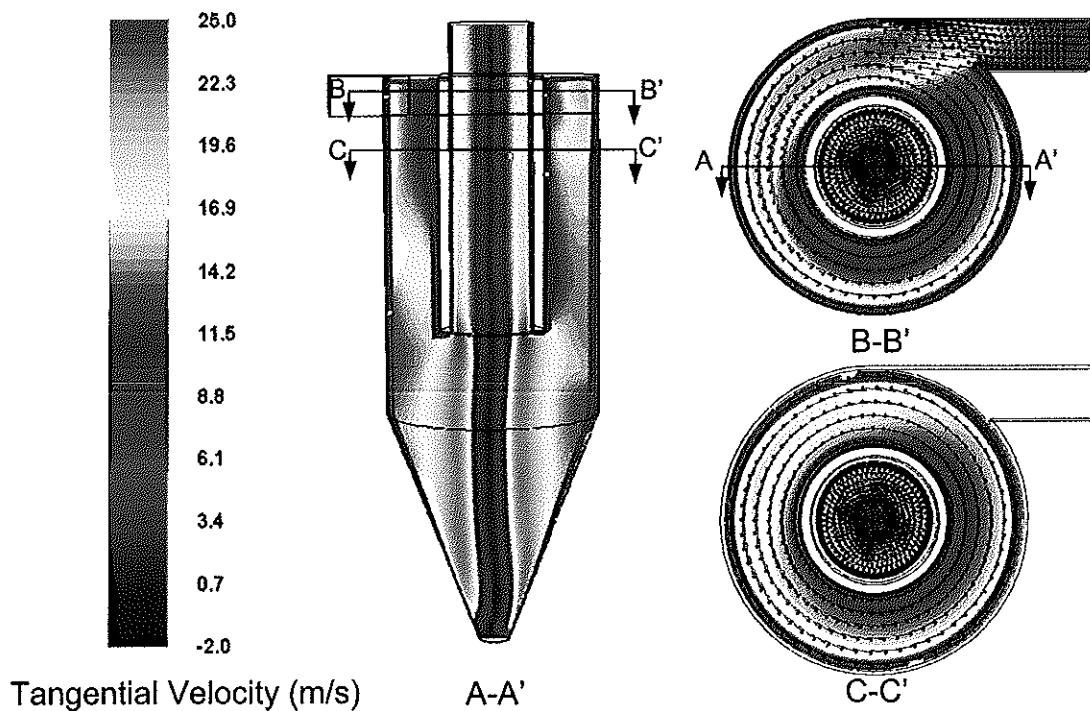


รูปที่ 5.7 ตำแหน่งผลของความเร็วในไซโคลน

5.3.1 ความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน

จากผลการจำลองที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (รูปที่ 5.8) พบว่าการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลนนั่นค่อนข้างสมมาตรกับแกนกลาง ความเร็วในแนวสัมผัสจะมีค่าสูงที่สุดตรงบริเวณที่รัศมี $x = -0.016$ m และ $x = 0.016$ m และมีค่าต่ำที่สุดบริเวณผนังและแกนกลางของไซโคลน จากรูปที่ 5.8 หน้าตัด B-B' พบว่าความเร็วบริเวณทางเข้าของไซโคลนมีความเร็วสัมผัสมีค่าสูงที่สุด และความเร็วค่อย ๆ ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นลักษณะของการไหลหมุนวนภายในไซโคลน และจะไหลวนเป็นเกลียวรอบผนังภายในไซโคลน เกิดขึ้นเนื่องจากกลไกของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะถูกเหวี่ยงให้ออกจากกระแส

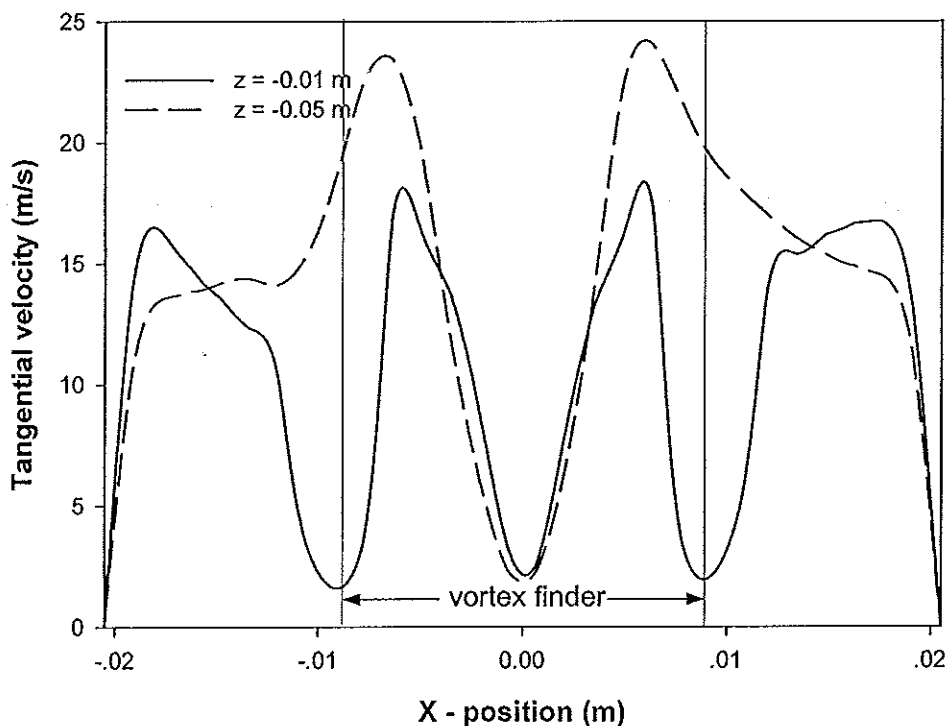
อากาศแล้วไปชนกับผนังของไซโคลนตกลงสู่ด้านล่าง ซึ่งรูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสที่ความเร็วทางเข้าอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) จะมีลักษณะเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ โดยค่าความเร็วในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลนมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความเร็วในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลนก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 5.8 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลนที่
ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s

ผลของความเร็วในแนวสัมผัสที่ในตำแหน่งแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m ในไซโคลน แสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m ลักษณะของความเร็วจะมีค่าขึ้นและลง เนื่องจากความเร็วในแนวสัมผัสที่ผนังและกึ่งกลางของไซโคลนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m ในแนวรัศมีมีผนัง 4 ผนัง ซึ่งประกอบด้วย ผนังด้านข้างทรงกระบอกสองข้างของไซโคลน ($x = -0.0205$ m, 0.0205 m) และผนังด้านข้างสองข้างของ vortex finder ($x = -0.016$ m, 0.016 m) จึงทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m มีลักษณะขึ้น ๆ ลง ๆ ส่วนที่ตำแหน่ง $z = 0.05$ m ลักษณะที่เกิดขึ้นเป็นไปตามหลักของความเร็วในแนวสัมผัสที่เกิดกับไซโคลนทั่วไปคือจากตำแหน่งผนังด้านข้างสองข้างของไซโคลนในแนวรัศมี ความเร็ว

แนวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นและจะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ที่จุดกึ่งกลางในแนวรัศมีหรือแกนอากาศ และความเร็วในแนวสัมผัสที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างสมมาตร และความเร็วในแนวสัมผัสสูงสุดสำหรับอยู่ที่รัศมี $x = -0.06$ m และ $x = 0.06$ m ซึ่งบริเวณนี้จะทำให้ออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ถูกเหวี่ยงออกจากกระแสอากาศไปชนกับผนังของไซโคลนและตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลนก่อนติดไปกับกระแสอากาศแล้วเคลื่อนที่สู่ด้านบน และแนวโน้มกระจายความเร็วในแนวสัมผัสจากการจำลองในงานวิจัยนี้เหมือนกับผลจากการจำลองความเร็วในแนวสัมผัสในหัวข้อที่ 5.1

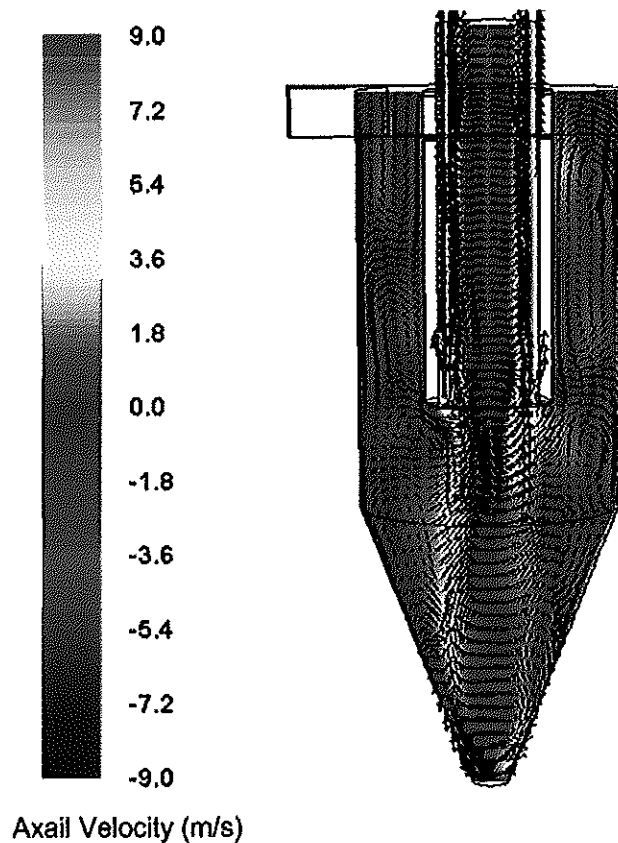


รูปที่ 5.9 โปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน

5.3.2 ความเร็วในแนวแกนในไซโคลน

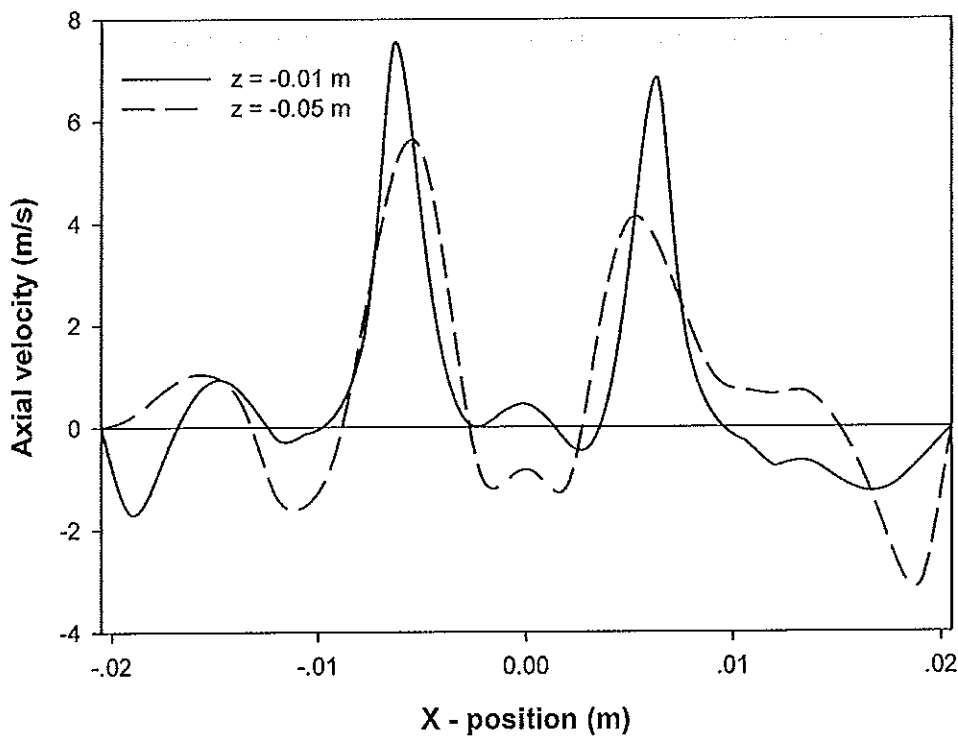
ผลการจำลองความเร็วในแนวแกนที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s แสดงในรูปที่ 5.10 พบว่าการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลนนั้นไม่สมมาตรกับแกนกลาง การกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนมีทิศทางการไหลของของไหลทั้งในทิศทางขึ้นและลง โดยการไหลที่บริเวณผนังของไซโคลนจะเคลื่อนที่ในทิศทางลงสู่ด้านล่าง ส่วนการไหลที่บริเวณด้านใน vortex finder จะเคลื่อนที่ในทิศทางขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งจากการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกันภายในไซโคลนทำให้เกิดบริเวณที่ค่าความเร็วในแนวแกนมีค่าเป็นศูนย์ จากลักษณะการกระจาย

ตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลน แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่บริเวณผนังของไซโคลนจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่าง ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งอยู่ใกล้ผนังของไซโคลนเคลื่อนที่ในทิศทางขึ้นด้านบน ซึ่งจากการเคลื่อนที่ของของไหลบ่งชี้ว่าเป็นการคัดแยกด้วยกลไกการไหลในไซโคลน และมีบางจุดในไซโคลนที่มีการไหลแบบหมุนวน ซึ่งจุดนี้เป็นผลเสียกับการแยกจึงทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่หลุดออกจากกระแสอากาศ แต่จะเคลื่อนที่ปะปนกับกระแสหมุนวนนั้น แต่จากรูปที่ 5.10 มีกระแสหมุนวนเกิดขึ้นน้อย จึงถือว่าการแยกของไซโคลนมีประสิทธิภาพสูง ซึ่ง นอกจากนี้รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนที่ความเร็วทางเข้าอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) จะมีลักษณะเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ แต่ค่าความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลนมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลนก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 5.10 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s

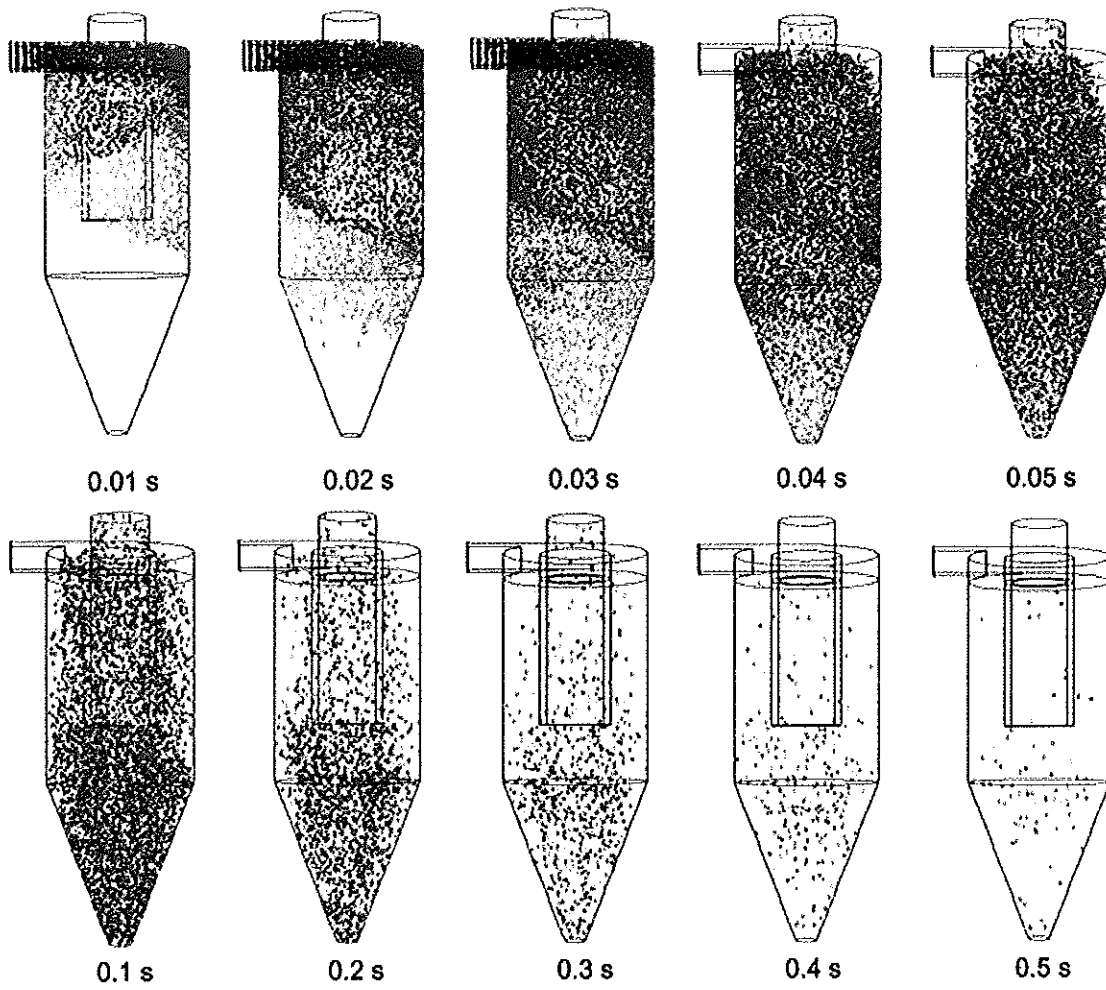
ผลของความเร็วในแนวแกนที่ในตำแหน่งแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m ในไซโคลน แสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าลักษณะของความเร็วที่เกิดขึ้นของทั้งสองตำแหน่งนั้นมีแนวโน้มการกระจายความเร็วในรูปแบบคล้ายกันเดียวกัน และความเร็วในแนวแกนสูงที่สุดที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m อยู่ที่รัศมี $x = -0.06$ m และ $x = 0.06$ m โดยที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m จะมีค่าการกระจายความเร็วในแนวแกนโดยเฉลี่ยสูงกว่าที่ตำแหน่ง $z = 0.05$ m เป็นเพราะว่าความเร็วจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณใกล้ ๆ ผนังของ vortex finder และทั้งสองตำแหน่งมีลักษณะความเร็วในแนวแกนที่เกิดขึ้นเป็นไปตามหลักของการความเร็วในแนวแกนในไซโคลนทั่วไปซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับความเร็วในแนวแกนในหัวข้อที่ 5.1 ทั้งตำแหน่ง $z = 0.32$ m และ $z = 0.38$ m คือความเร็วในแนวแกนจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ผนังและจุดกึ่งกลางของไซโคลน ซึ่งจะมีความเร็วสูงสุดบริเวณใกล้ ๆ กับผนัง vortex finder



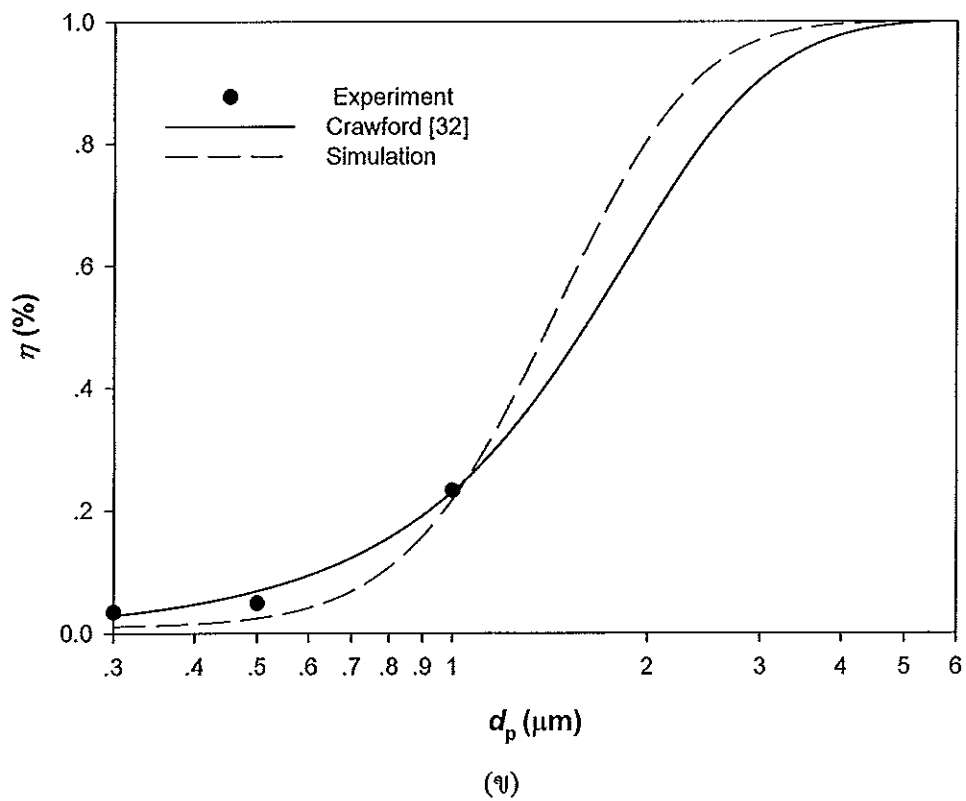
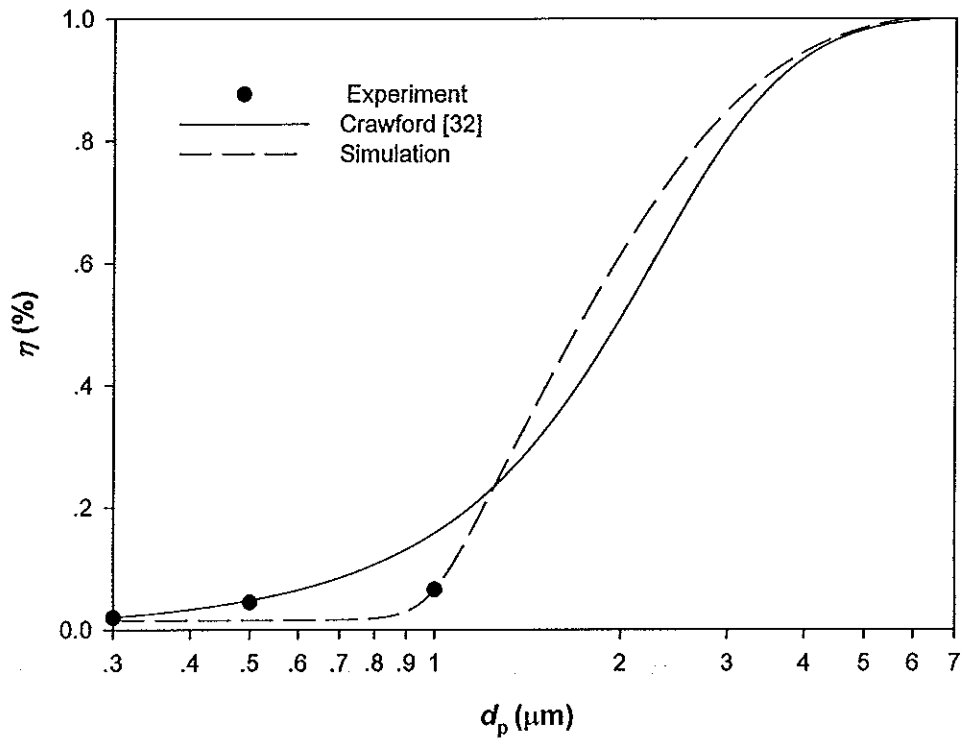
รูปที่ 5.11 โปรไฟล์ความเร็วในแนวแกนในไซโคลน

5.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลนและประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้วิธี DPM ปล่อยอนุภาคจำนวน 14,479 อนุภาค ตามเวลาที่กำหนด ซึ่งรูปที่ 5.12 เป็นตัวอย่างในการจำลองการปล่อยอนุภาคขนาด $1 \mu\text{m}$ ที่ความเร็ว 19.90 m/s จนเมื่อถึงที่เวลา 0.03 s จำนวนอนุภาคจะครบ 14,479 อนุภาค จากนั้นจึงหยุดปล่อยอนุภาค อนุภาคก็จะเคลื่อนที่ต่อไปในไซโคลน โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีลักษณะหมุนวนเป็นเกลียวไปตามรูปร่างของไซโคลน อนุภาคที่ถูกเหวี่ยงหลุดจากกระแสอากาศก็จะชนกับผนังและตกลงสู่ด้านล่าง ส่วนอนุภาคที่ไม่ถูกเหวี่ยงออกจากกระแสอากาศก็จะเคลื่อนที่ไปกับกระแสอากาศหมุนวนออกสู่ด้านบน เมื่อเวลาผ่านไปจนไม่มีอนุภาคเคลื่อนที่ที่อยู่ภายในไซโคลนก็จะจบการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลน จากนั้นจึงทำการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ความเร็ว 13.27 และ 19.90 m/s ขนาดอนุภาค 3 ขนาด คือ 0.3 , 0.5 และ $1 \mu\text{m}$ แล้วเปรียบเทียบผลการทดลอง [4] กับทฤษฎีของ Crawford [32] ดังแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่า ประสิทธิภาพการดักจับของผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองและแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎี แสดงว่าการจำลองในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใส่เข้าไปในแบบจำลอง ซึ่งขนาดตัดของผลการจำลองที่ความเร็ว 13.27 และ 19.90 m/s คือ 1.7 และ $1.4 \mu\text{m}$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความเร็วมีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับ สังเกตได้จากความเร็ว 19.90 m/s ขนาดตัดของอนุภาคเล็กกว่าที่ความเร็ว 13.27 m/s เนื่องมาจากความเร็วที่สูงของกระแสอากาศที่ไหลเข้าไปในไซโคลนเกิดเป็นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไซโคลนทำให้อนุภาคหลุดออกจากกระแสอากาศได้ง่าย จึงทำให้มีประสิทธิภาพการดักจับสูงขึ้น แต่ถ้าความเร็วที่เข้าสู่ไซโคลนมีค่าสูงเกินไปอนุภาคที่ถูกแยกออกจากกระแสอากาศที่ด้านล่างของไซโคลนอาจถูกหอบกลับเข้าสู่กระแสหมุนวนอีกครั้งจะทำให้อนุภาคติดไปกับกระแสอากาศแล้วเคลื่อนที่ออกสู่ด้านบนของไซโคลน ถ้าหากความเร็วที่เข้าสู่ไซโคลนมีค่าต่ำเกินไป การหมุนวนของกระแสอากาศภายในไซโคลนอาจจะไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคถูกแยกออกจากกระแสอากาศ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับของไซโคลนลดลงเช่นกัน [27]



รูปที่ 5.12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาด $1 \mu\text{m}$ ภายในไซโคลนที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดักจับกับขนาดอนุภาคที่ความเร็ว

(ก) 13.27 m/s (ข) 19.90 m/s

บทที่ 6

ผลการจำลองและการวิจารณ์ผลของไซโคลน-เส้นใยกรอง

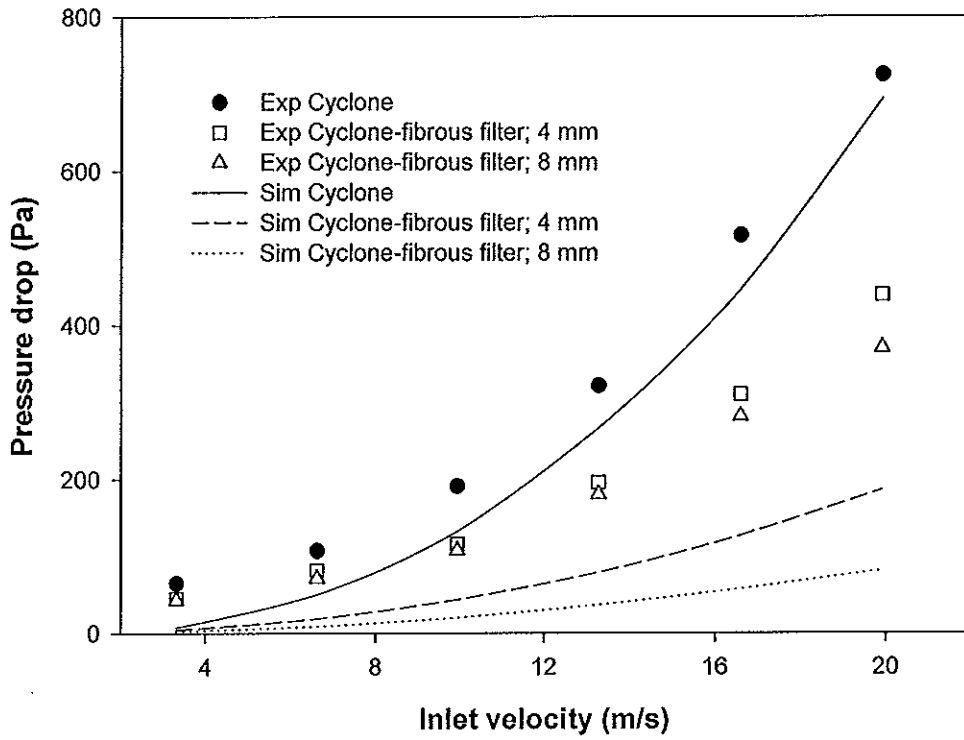
ในบทนี้เป็นผลการจำลองของไซโคลน-เส้นใยกรอง ซึ่งเส้นใยกรองที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ เส้นใยไฟเบอร์ และเส้นใยสแตนเลส บรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกไซโคลน ทำการติดตั้ง 2 แบบ คือ เส้นใยไฟเบอร์ ติดตั้งเป็นแบบกริป 4 กริป มีความยาวของกริป 4 mm และ 8 mm ส่วนเส้นใยสแตนเลสบรรจุเต็มช่องว่างมีน้ำหนัก 0.94 g และ 1.83 g ดังนั้นจะเรียกไซโคลน-เส้นใยกรองที่ทำการศึกษาทั้ง 4 แบบ ดังนี้ ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองในบทนี้ประกอบไปด้วย ความดันสูญเสีย การกระจายความดัน การเคลื่อนที่ของกระแสอากาศและอนุภาคภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.1 ความดันสูญเสียในไซโคลน -เส้นใยกรอง

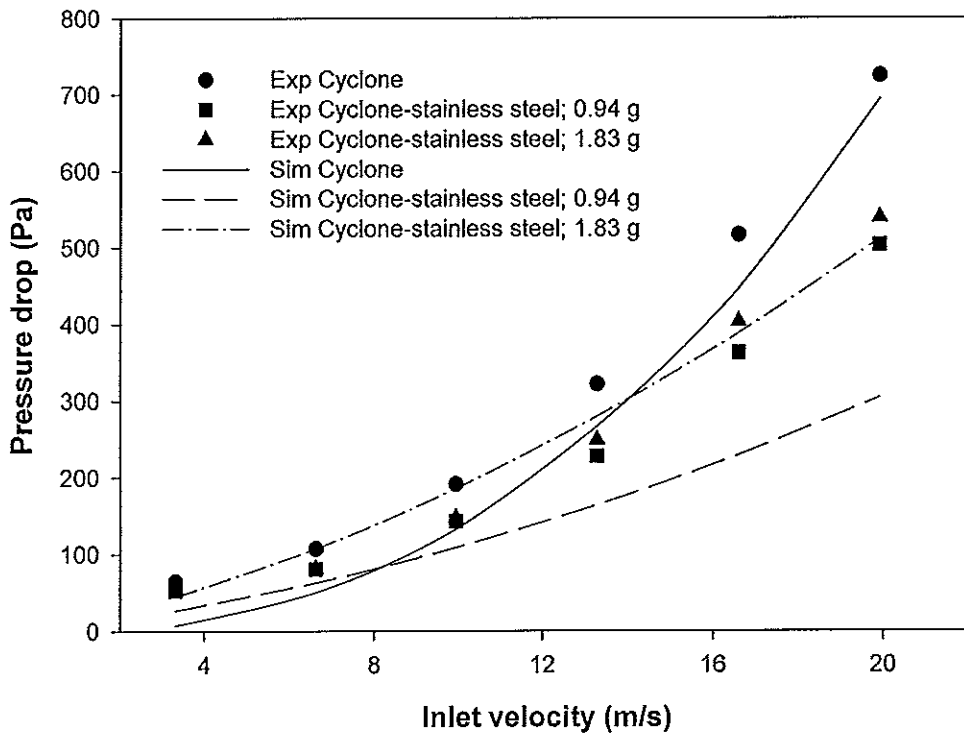
ในหัวข้อนี้ได้เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง [4] โดยใช้ขนาดของไซโคลน ดังรูปที่ 4.4 โดยศึกษาความดันที่สูญเสียในไซโคลน-เส้นใยกรองที่ความเร็วทางเข้า 3.32, 6.63, 9.95, 13.27, 16.59 และ 19.90 m/s ตามลำดับ จากรูปที่ 6.1 (ก) และ (ข) พบว่า แนวโน้มของความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น จากการจำลองความดันสูญเสียในไซโคลน ไซโคลน-เส้นใยเบอร์ และไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส พบว่าความดันสูญเสียในไซโคลนมีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดจากการทดลอง 17.2% โดยเมื่อเทียบงานของ Wang et al. [40] พบว่าความดันสูญเสียในไซโคลนมีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดจากการทดลอง 17.6% ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัย อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ถือว่าผลการจำลองที่ได้ออกมาแล้วมีความแม่นยำ ส่วนไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm มีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดจากการทดลอง 57.6% ความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm มีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดจากการทดลอง 77.9% ความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g มีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดจากการทดลอง 39.6% และความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g มีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดจากการทดลอง 5.1% จากผลการจำลองความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยกรองในงานวิจัยนี้มีค่าเบี่ยงเบนจากการทดลองค่อนข้างมาก เนื่องจากความเสมือนจริงของเส้นใยกรองในเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณ ไม่สามารถตั้งค่าให้มีการเรียงตัว

เหมือนกับเส้นใยกรองของจริง จึงทำให้เกิดการค่าการเบี่ยงเบนไปจากการทดลอง แต่ผลการจำลองของไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยกรองในงานวิจัยนี้ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดลอง [4] โดยไซโคลน-เส้นใยกรองทั้ง 2 ชนิดมีความดันสูญเสียต่ำกว่าไซโคลน เนื่องมาจากเส้นทางการเคลื่อนของกระแสอากาศในไซโคลน-เส้นใยกรองสั้นกว่าไซโคลน ดังตารางที่ 6.1 ที่แสดงระยะทางในการเคลื่อนของกระแสอากาศภายในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยกรอง จึงทำให้ไซโคลน-เส้นใยกรองมีการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยกว่าไซโคลน เป็นผลให้ความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยกรองต่ำกว่าไซโคลน

ผลของความดันสูญเสียในไซโคลนเปรียบเทียบกับไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm แสดงในรูปที่ 6.1 (ก) พบว่าความดันสูญเสียในไซโคลนมีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm เนื่องจากไซโคลนมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศที่เป็นรูปแบบการไหลหมุนวนมากกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ ดังรูปที่ 6.2 และตารางที่ 6.1 โดยไซโคลนมีระยะทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศเฉลี่ย 19.086 m ซึ่งไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm มีเส้นทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศเฉลี่ยเพียง 8.553 m และ 7.014 m ตามลำดับ จากระยะทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศของไซโคลนมากกว่าจึงทำให้ความดันสูญเสียมีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm และเช่นเดียวกันไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm มีค่าความดันสูญเสียสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm เนื่องจากความยาวของครีบที่สั้นกว่า จึงทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศสูงกว่าและเกิดกระแสอากาศหมุนวนมากกว่า จึงเป็นผลให้ความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm มีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm

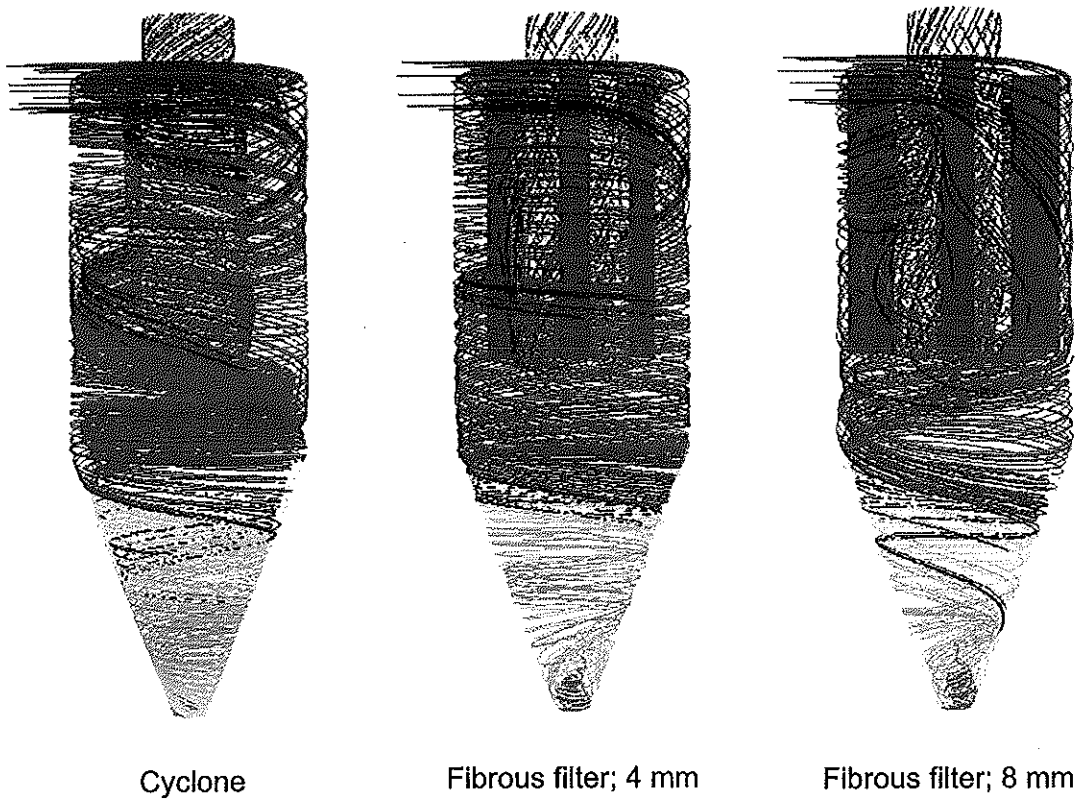


(ก)



(ข)

รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็วในไซโคลน-เส้นใยกรอง
(ก) เส้นใยไฟเบอร์ (ข) เส้นใยสแตนเลส



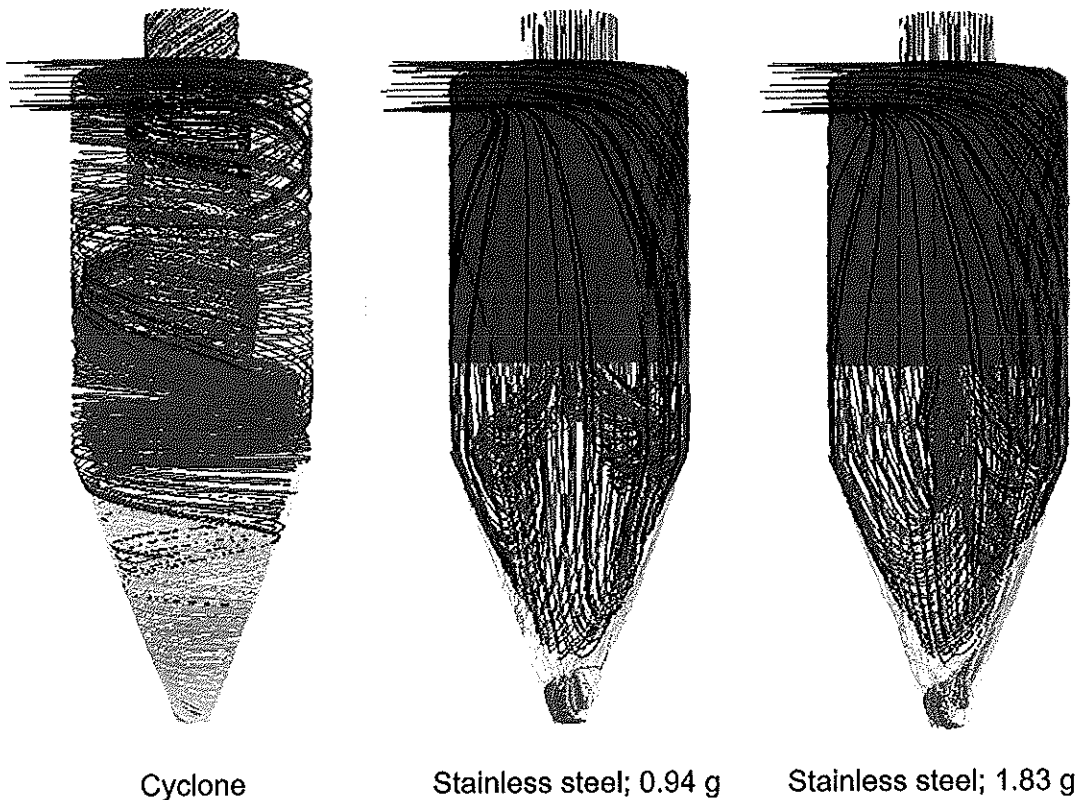
รูปที่ 6.2 การไหลของกระแสดูดอากาศภายในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์

ตารางที่ 6.1 ระยะทางเฉลี่ยของกระแสดูดอากาศที่เคลื่อนที่ภายในไซโคลนรูปแบบต่าง ๆ

ชนิด	ระยะทาง (m)
Cyclone	19.086
Cyclone+fibrous filter; 4 mm	8.553
Cyclone+fibrous filter; 8 mm	7.014
Cyclone+stainless steel; 0.94 g	6.788
Cyclone+stainless steel; 1.83 g	6.522

จากผลการจำลองของความดันสูญเสียในไซโคลนเปรียบเทียบไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g แสดงในรูปที่ 6.1 (ข) พบว่าความดันสูญเสียในไซโคลนมีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g เนื่องจากไซโคลนมีระยะทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศในรูปแบบการไหลหมุนวนมากกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ดังรูปที่ 6.3 และตาราง 6.1 ซึ่งไซโคลนมีระยะการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศเฉลี่ย 19.086 m ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g มีระยะทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศเฉลี่ยเพียง 6.788 m และ 6.522 m ตามลำดับ อีกทั้งการไหลของกระแสอากาศในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสมีรูปแบบเปลี่ยนไปไม่เป็นในลักษณะหมุนวน เมื่อกระแสอากาศเคลื่อนที่เข้ามาในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสแล้วชนกับเส้นใยสแตนเลส ทำให้กระแสอากาศเคลื่อนลงสู่ด้านล่างแล้วม้วนตัวเคลื่อนที่ป็นปวนบริเวณทรงกระบอกและทรงกรวยของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ก่อนที่จะเคลื่อนที่สู่ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และความดันสูญเสียในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g มีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g เนื่องจากไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g มีปริมาณเส้นใยกรองมากกว่า ทำให้มีความหนาแน่นของเส้นใยกรองมาก เป็นผลให้ขวางการไหลของกระแสอากาศเกิดการสูญเสียพลังงานสูงกว่าเป็นผลให้ความดันสูญเสียมีค่าสูงกว่านั่นเอง

สรุปผลจากความดันสูญเสียพบว่าไซโคลนมีค่าความดันสูญเสียสูงที่สุดสอดคล้องกับการทดลอง รองลงมาคือไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ตามลำดับ ซึ่งไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส มีค่าความดันสูญเสียสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ โดยจะอภิปรายผลนี้ในหัวข้อ



รูปที่ 6.3 การไหลของกระแสอากาศภายในไซโคลนและไซโคลนเส้นใยสแตนเลส

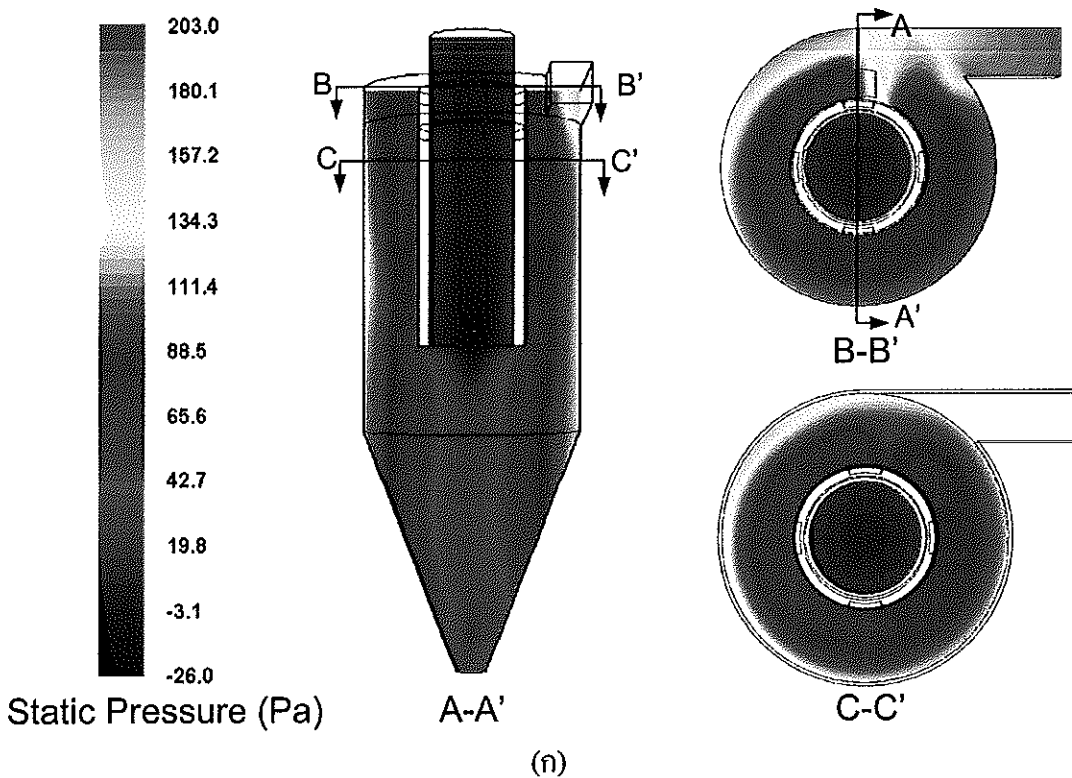
6.2 การกระจายความดันในไซโคลน-เส้นใยกรอง

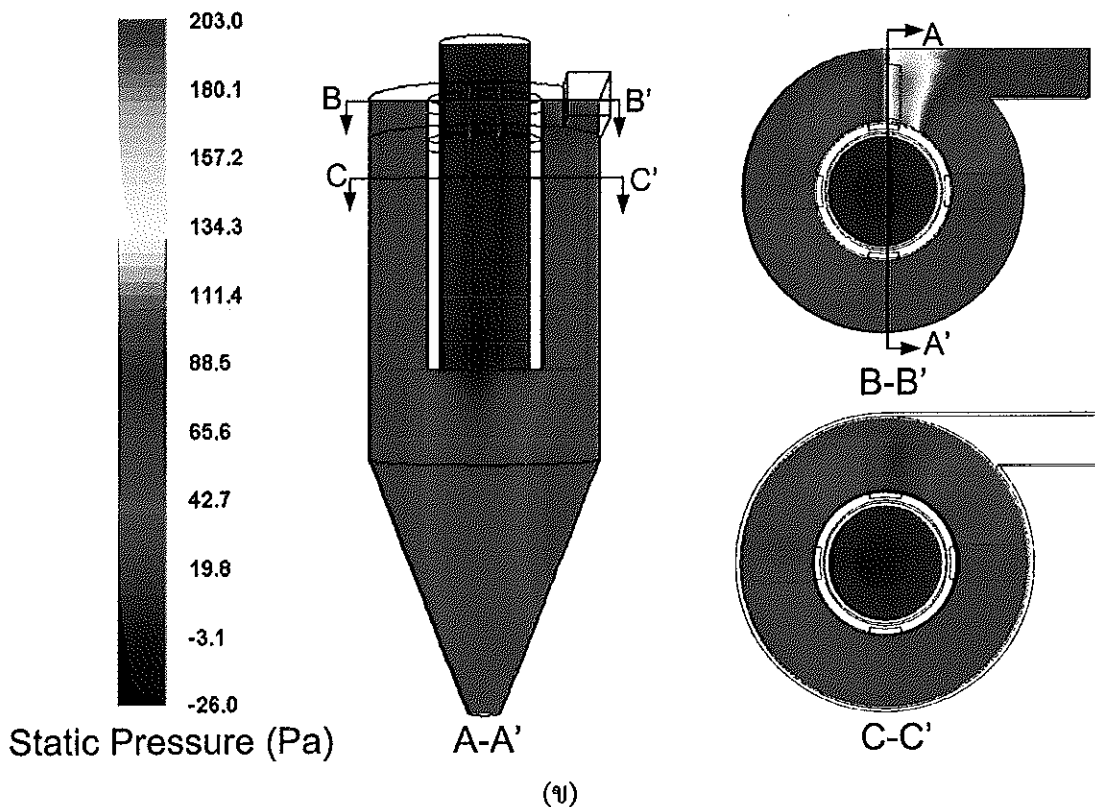
ในหัวข้อนี้เป็นผลของการกระจายความดันในไซโคลน-เส้นใยกรอง ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าความดันที่เกิดภายในไซโคลน-เส้นใยกรองมีรูปแบบการกระจายตัวอย่างไร ผลการกระจายความดันในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์และไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.1 ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์

การกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ แสดงในรูปที่ 6.4 (ก) และ (ข) สำหรับไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s พบว่าความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm บริเวณใกล้ผนังทรงกระบอกมีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm เนื่องจากความยาวครึ่งที่สั้นกว่าทำให้กระแสอากาศไหลผ่านมากกว่า ดังเกตได้จากรูปที่ 6.4 (ก) ที่หน้าตัด B-B' และเช่นกันรูปที่ 6.4 (ข) ที่หน้าตัด B-B' จากความยาวของครึ่ง

เมื่อกระแสอากาศไหลมาแล้วชนกับเส้นใยไฟเบอร์ 8 mm จะเกิดการต้านการไหลของกระแสอากาศตรงส่วนบริเวณนั้นมาก ทำให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้การกระจายความดันในบริเวณอื่น ๆ รวมทั้งบริเวณใกล้ผนังทรงกระบอกของไซโคลอนมีค่าที่ต่ำลง ซึ่งการกระจายตัวของความดันในลักษณะนี้เกิดจากกลไกของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศภายในไซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์หมุนวนเป็นเกลียวลงเป็นชั้น ๆ ดังแสดงรูปที่ 6.4 (ก) ที่หน้าตัด C-C' และ รูปที่ 6.4 (ข) ที่หน้าตัด C-C' และความแตกต่างของค่าความดันในแนวแกนรัศมีมากกว่าในแนวแกนไซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์อีกด้วย นอกจากนี้รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ที่ความเร็วอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) มีรูปแบบการกระจายความดันเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s แต่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ก็จะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ดังได้แสดงในภาคผนวก ก



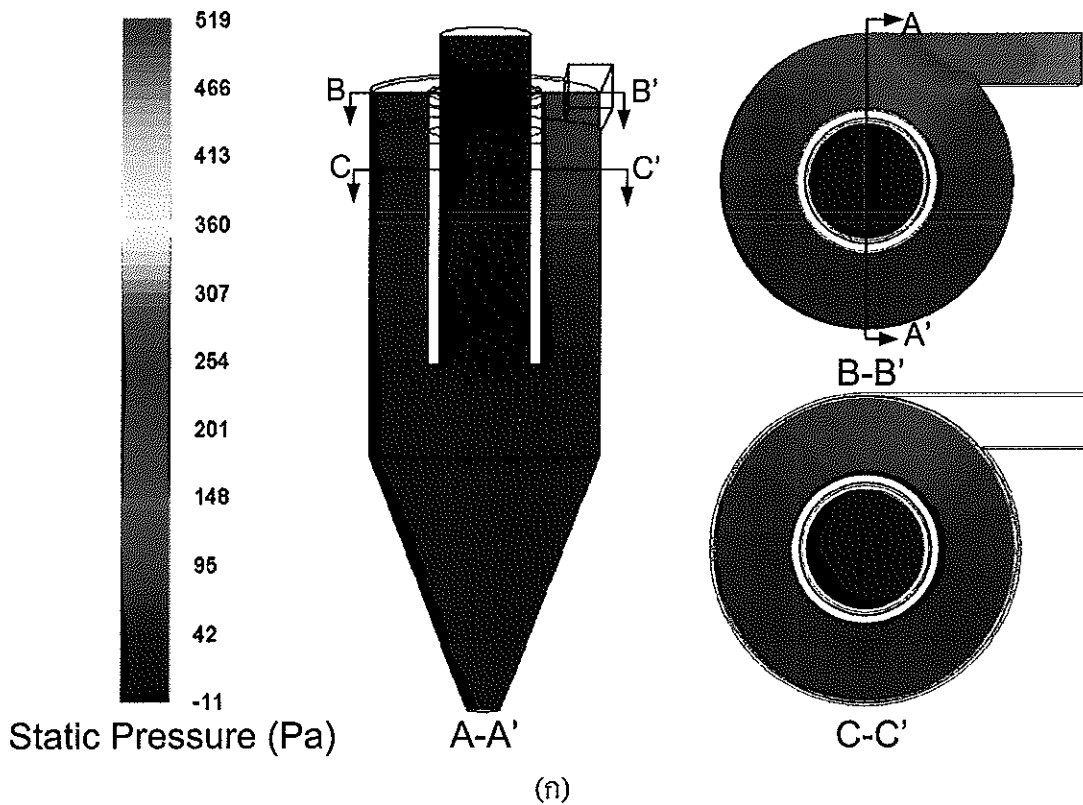


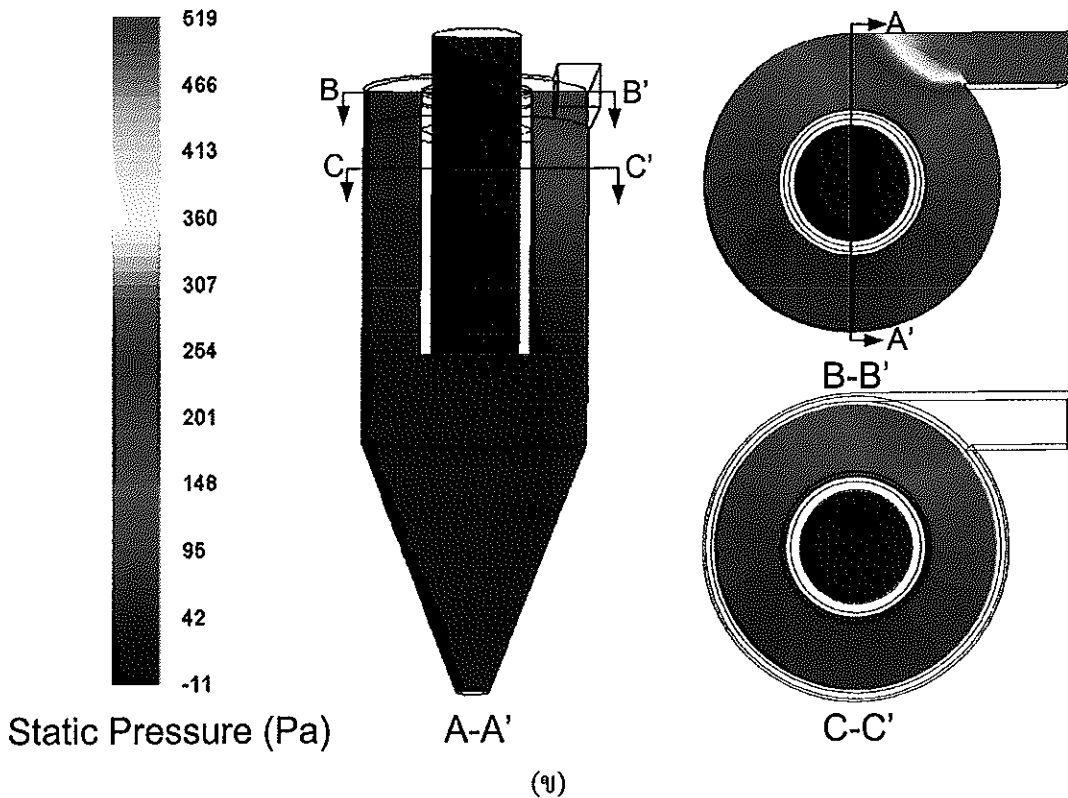
รูปที่ 6.4 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์
ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm (ข) เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm

6.2.2 ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส

การกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส แสดงในรูปที่ 6.5 (ก) และ (ข) สำหรับไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s พบว่า ความดันไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g มีรูปแบบการกระจายตัวเหมือนกัน ต่างกันที่ความดันในบริเวณทางเข้า ซึ่งความดันที่บริเวณทางเข้าในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g มีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ก) ที่หน้าตัด B-B' และ รูปที่ 6.5 (ข) ที่หน้าตัด B-B' เมื่อกระแสอากาศไหลมาชนกับเส้นใยสแตนเลส 1.83 g จะเกิดการต้านการไหลของกระแสอากาศตรงบริเวณนั้นมากกว่าเส้นใยสแตนเลส 0.94 g เนื่องจากความหนาแน่นเส้นใยสแตนเลสที่บรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออก ทำให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็วตรงบริเวณที่กระแสอากาศชนกับเส้นใยสแตนเลส ส่งผลให้ความดันในบริเวณอื่นจึงมีค่าที่ต่ำ การเคลื่อนที่กระแสอากาศภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสมีลักษณะการเคลื่อนที่ไม่เป็นแบบหมุนวน เมื่อกระแสอากาศเคลื่อนที่เข้ามาในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสแล้วชนกับเส้นใยสแตนเลส ทำให้กระแสอากาศเคลื่อนลงสู่ด้านล่าง ส่งผลให้การกระจาย

ความดันที่เส้นไฮสแตนต์ที่เกิดขึ้นนั้นค่อย ๆ ลดค่าเป็นชั้น ๆ บริเวณเส้นไฮสแตนต์ ก่อนที่กระแสอากาศหมุนตัวเคลื่อนที่ปั่นป่วนบริเวณทรงกระบอกและทรงกรวยของไซโคลน-เส้นไฮสแตนต์แล้วเคลื่อนที่สู่ด้านบน สังเกตได้จากรูปที่ 6.3 และความแตกต่างของค่าความดันในแนวแกนรัศมีมีมากกว่าในแนวแกนไซโคลนอีกด้วย นอกจากนี้รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นไฮสแตนต์ที่ความเร็วอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) มีรูปแบบการกระจายความดันเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s แต่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลน-เส้นไฮสแตนต์ก็จะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ดังได้แสดงในภาคผนวก ก

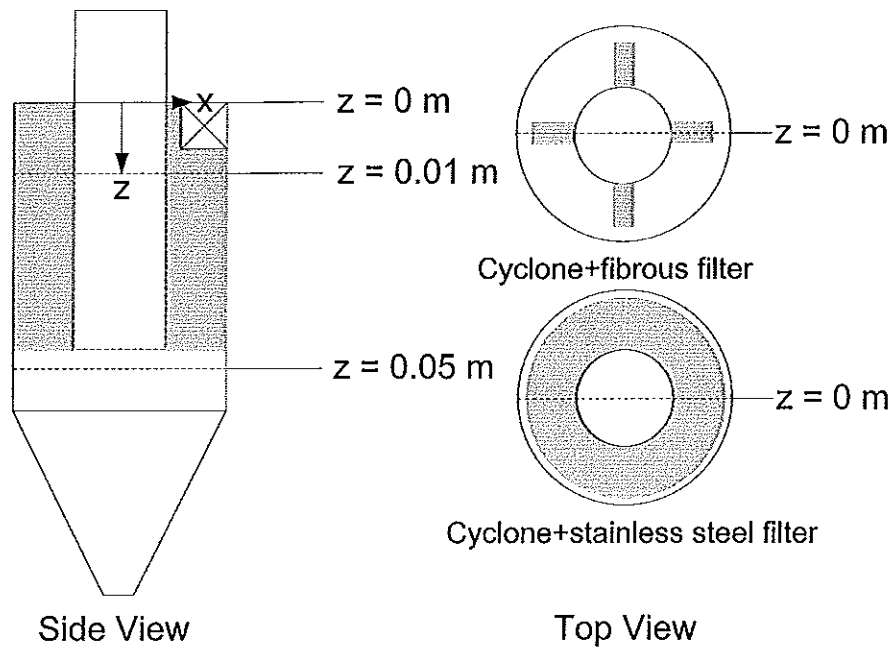




รูปที่ 6.5 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยสแตนเลส 0.94 g (ข) เส้นใยสแตนเลส 1.83 g

6.3 ความเร็วในไซโคลน-เส้นใยกรอง

ในหัวข้อนี้เป็นผลการจำลองความเร็วในไซโคลน-เส้นใยกรอง ซึ่งในการจำลองใช้ขนาดของไซโคลน ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งความเร็วเป็นปัจจัยในการแยกอนุภาคออกจากกระแสอากาศที่บอกถึงสมรรถนะของไซโคลน-เส้นใยกรอง โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อแยกคือความเร็วในแนวสัมผัส และความเร็วในแนวแกน ซึ่งนำผลการคำนวณความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกน ณ ตำแหน่งที่ $z = 0.01$ และ $z = 0.05$ m ดังรูปที่ 6.6 โดยตำแหน่งที่ $z = 0.01$ m จะตัดผ่านเส้นใยกรองดังภาพ top view ส่วนตำแหน่งที่ $z = 0.05$ m ไม่ตัดผ่านเส้นใยกรอง เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองของความเร็วในบริเวณที่มีเส้นใยกรองและไม่มีเส้นใยกรองได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 6.6 ตำแหน่งผลของความเร็วจนในไซโคลน-เส้นใยกรอง

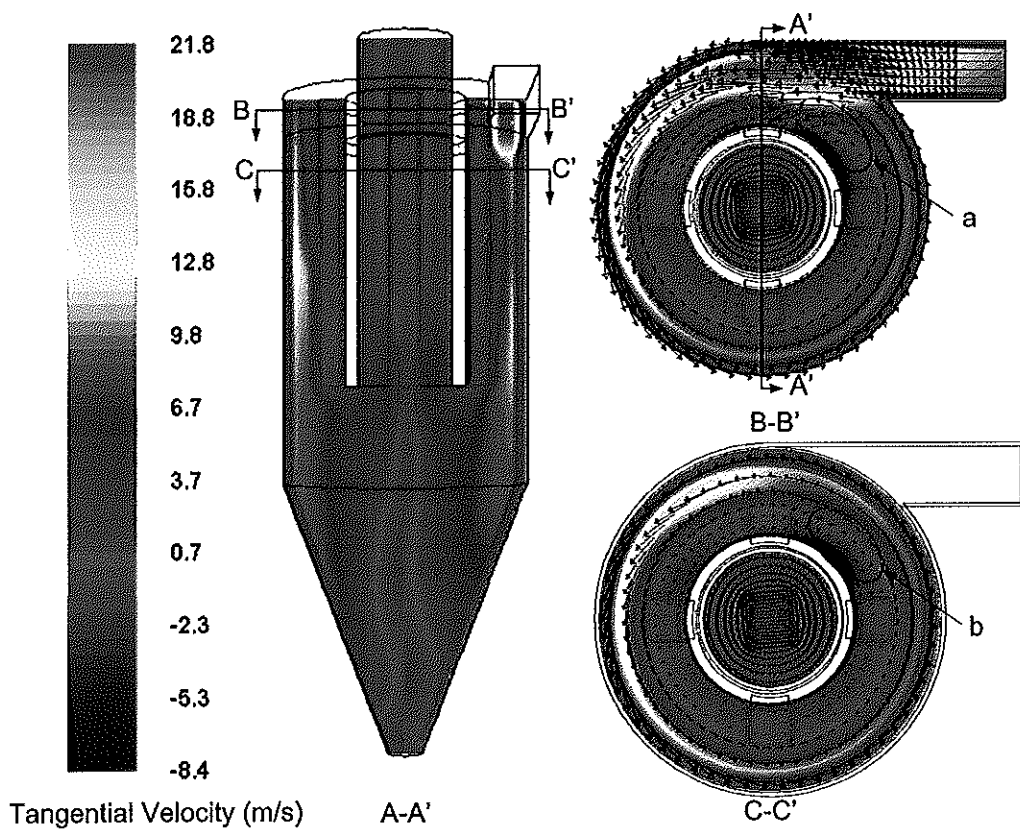
6.3.1 ความเร็วในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์

ความเร็วในแนวสัมผัส

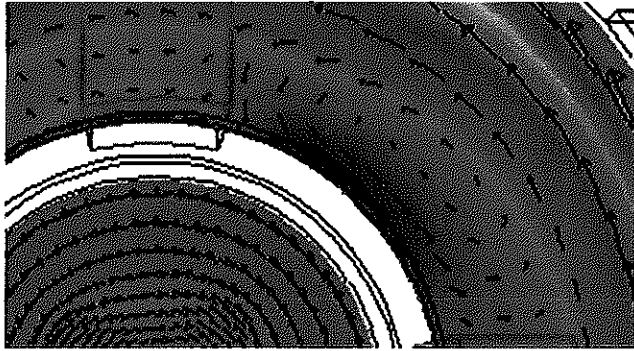
ผลความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm แสดงในรูปที่ 6.7 ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s พบว่าความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm นั้นจะมีค่ามากที่สุดบริเวณที่ทางเข้าที่ผ่านเส้นใยไฟเบอร์ และมีค่าต่ำที่สุดบริเวณผนังและแกนกลาง ซึ่งที่หน้าตัด A-A' ค่าความเร็วสัมผัสมีค่าสูงที่สุดบริเวณทางเข้า และความเร็วค่อย ๆ ลดลง แสดงให้เห็นลักษณะของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวรอบแกนภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ซึ่งเกิดจากผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และส่วนหนึ่งเมื่อกระแสอากาศไหลชนปะทะกับเส้นใยกรองทำให้กระแสอากาศเปลี่ยนทิศทางม้วนกลับแล้วไหลวนอยู่ตรงบริเวณตำแหน่ง a ที่หน้าตัด B-B' หรือดังรูปที่ 6.8 จากนั้นกระแสอากาศก็ไหลหมุนวนเป็นเกลียวมาตามรูปทรงกระบอกของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ ซึ่งสังเกตได้จากที่หน้าตัด C-C' โดยลักษณะการกระจายความเร็วนี้ในบริเวณใกล้กับผนังจะทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะถูกเหวี่ยงให้ออกจากกระแสอากาศแล้วไปชนกับผนังของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และช่วงบริเวณภายในส่วนทรงกระบอกของไซโคลนอนุภาคขนาดเล็กก็ถูกดักด้วยเส้นใยกรองมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพดักจับอนุภาคขนาดเล็กให้กับไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ นอกจากนี้รูปแบบการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-

เส้นใยไฟเบอร์ที่ความเร็วอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) มีรูปแบบเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ แต่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความเร็วในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ก็จะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย

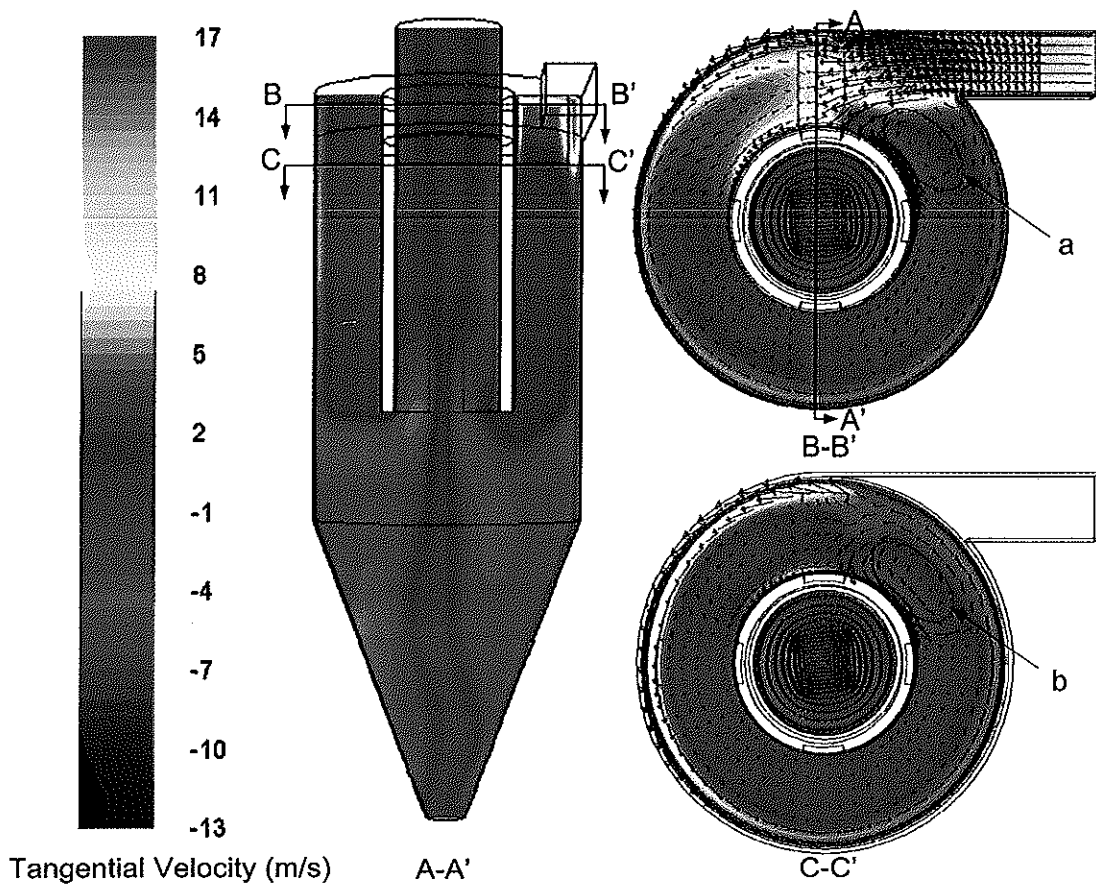
การศึกษาผลการคำนวณความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm แสดงในรูปที่ 6.9 ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s พบว่าการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm มีลักษณะคล้ายกับไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และเช่นเดียวกันจากรูปที่ 6.9 ที่หน้าตัด B-B' ที่ตำแหน่ง a หรือรูปที่ 6.10 มีลักษณะคล้ายกัน แต่ความยาวของครีบทําให้จำนวนรอบในการหมุนวนของกระแสอากาศนั้นน้อยกว่า และค่าความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm มีค่าต่ำกว่า ส่งผลให้โอกาสที่จะทำให้อนุภาคหลุดออกจากกระแสอากาศด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนั้นจะน้อยกว่าของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm แต่โอกาสที่อนุภาคจะถูกคักจับด้วยเส้นใยไฟเบอร์ของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm นั้นจะมีมากกว่าเนื่องความยาวครีบลเส้นใยไฟเบอร์



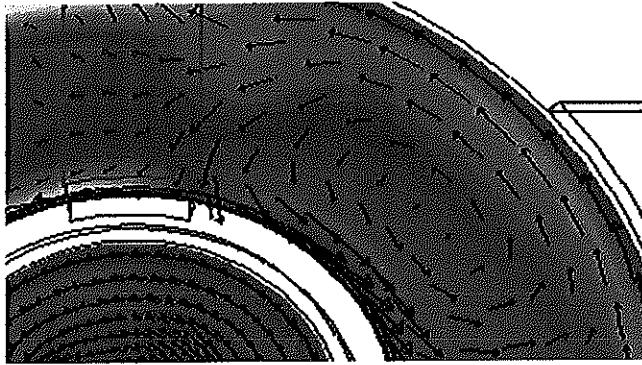
รูปที่ 6.7 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s



รูปที่ 6.8 ภาพขยายตำแหน่ง a ของรูปที่ 6.7 (B-B')

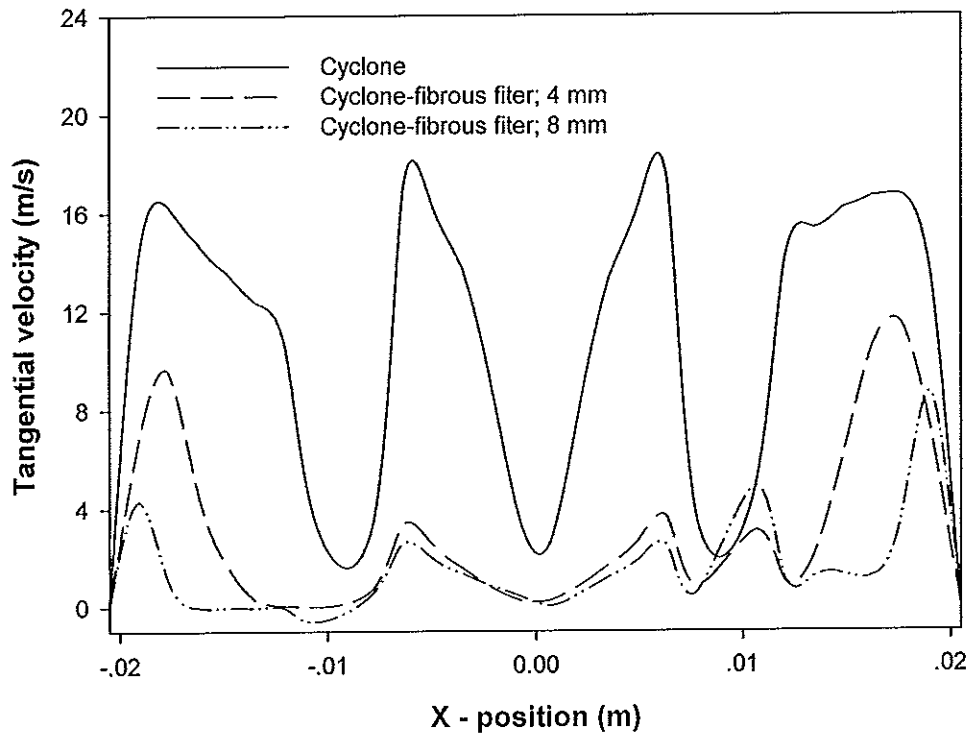


รูปที่ 6.9 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ที่
ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s

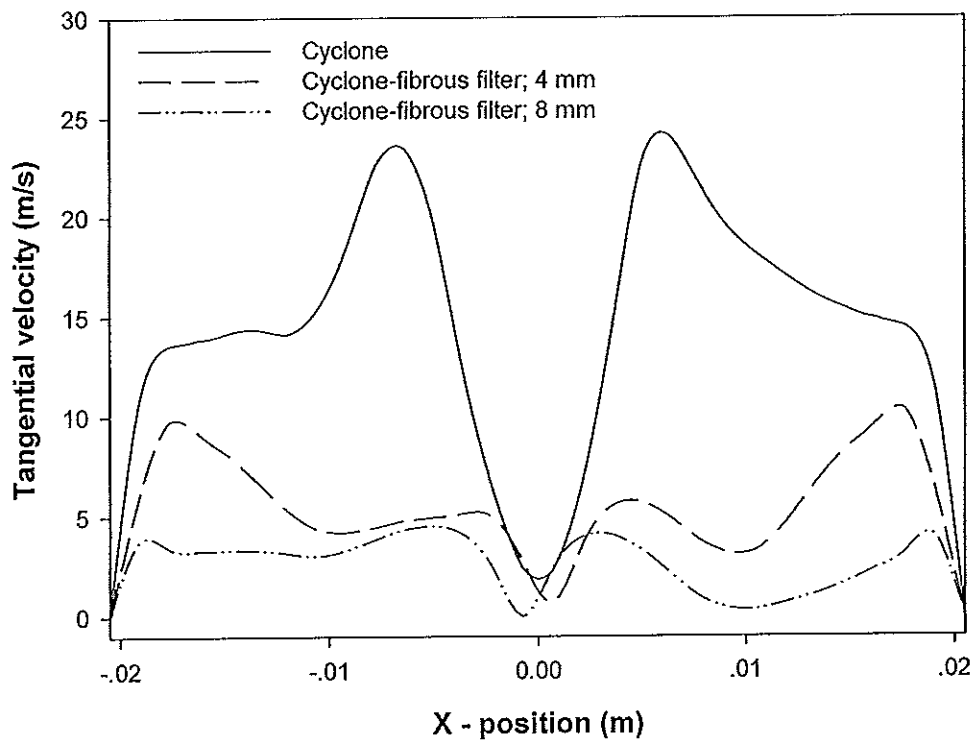


รูปที่ 6.10 ภาพขยายตำแหน่ง a ของรูปที่ 6.9 (B-B')

ผลของความเร็วในแนวสัมผัสในโซโคลอนและโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm ที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m และตัดผ่านครีบบของเส้นใยไฟเบอร์ (รูปที่ 6.6) แสดงในรูปที่ 6.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าความเร็วในแนวสัมผัสในโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับโซโคลอน และการกระจายตัวมีรูปแบบเปลี่ยนไปจากโซโคลอนเล็กน้อย เนื่องจากการติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ภายในท่อทางออกของโซโคลอน ทำให้เส้นใยไฟเบอร์ด้านการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศ ความเร็วในแนวสัมผัสจึงมีค่าลดลง แต่การกระจายความเร็วในแนวสัมผัสในโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ยังมีลักษณะคล้ายกับของโซโคลอน ซึ่งให้เห็นว่าการยังมีการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศภายในโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ในลักษณะไหลวน ยังคงมีกลไกของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแต่มีค่าต่ำกว่าโซโคลอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm ค่าความเร็วในแนวสัมผัสในโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm มีค่าสูงกว่าเนื่องจากความยาวของครีบบสั้นกว่าทำให้ขวางการไหลของกระแสอากาศได้น้อยกว่า แสดงว่ากลไกของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่จะทำให้อนุภาคหลุดออกจากกระแสอากาศของโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm มีสูงกว่าโซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm แต่อย่างไรก็ดีความเร็วที่ลดลงนี้อาจจะส่งผลให้การจับกับอนุภาคของเส้นใยไฟเบอร์ดักจับอนุภาคได้ง่ายขึ้นด้วยกลไกการแพร่ (diffusion) จึงทำให้อนุภาคเล็กที่มีโอกาสที่ถูกดักจับด้วยกลไกของเส้นใยไฟเบอร์



(ก)



(ข)

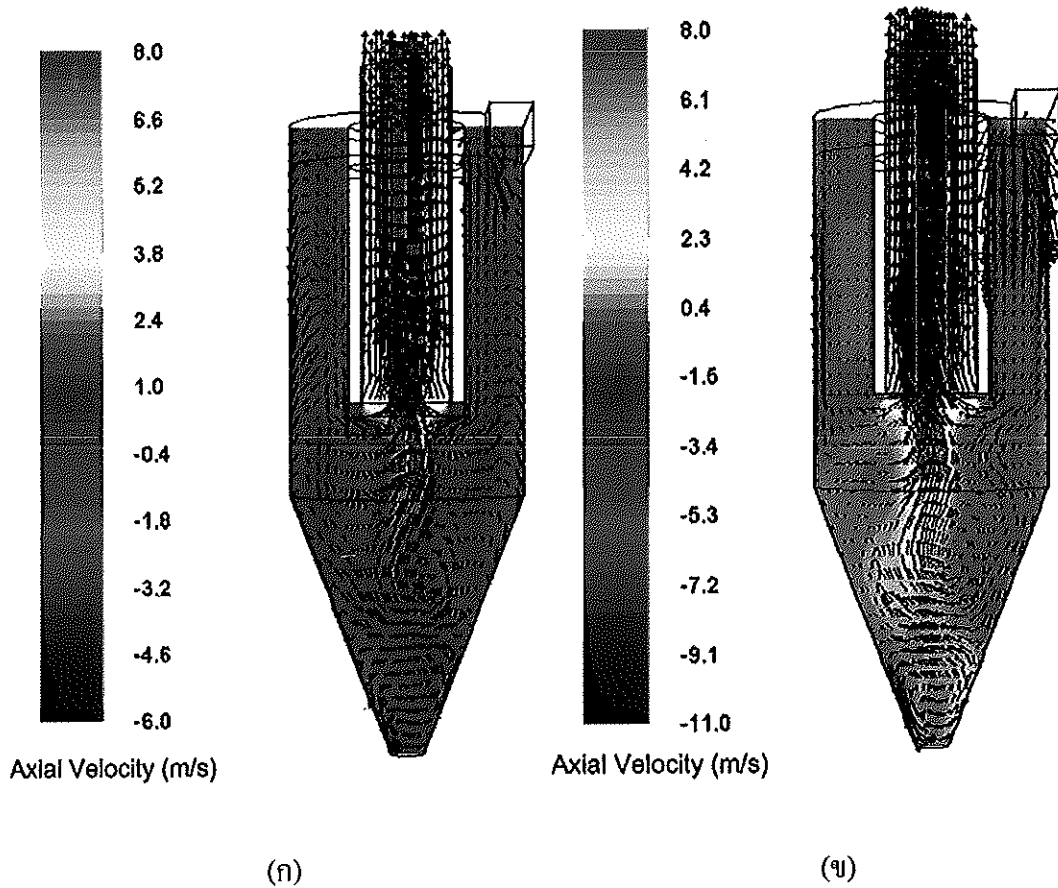
รูปที่ 6.11 โพรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์
ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m

ความเร็วในแนวแกน

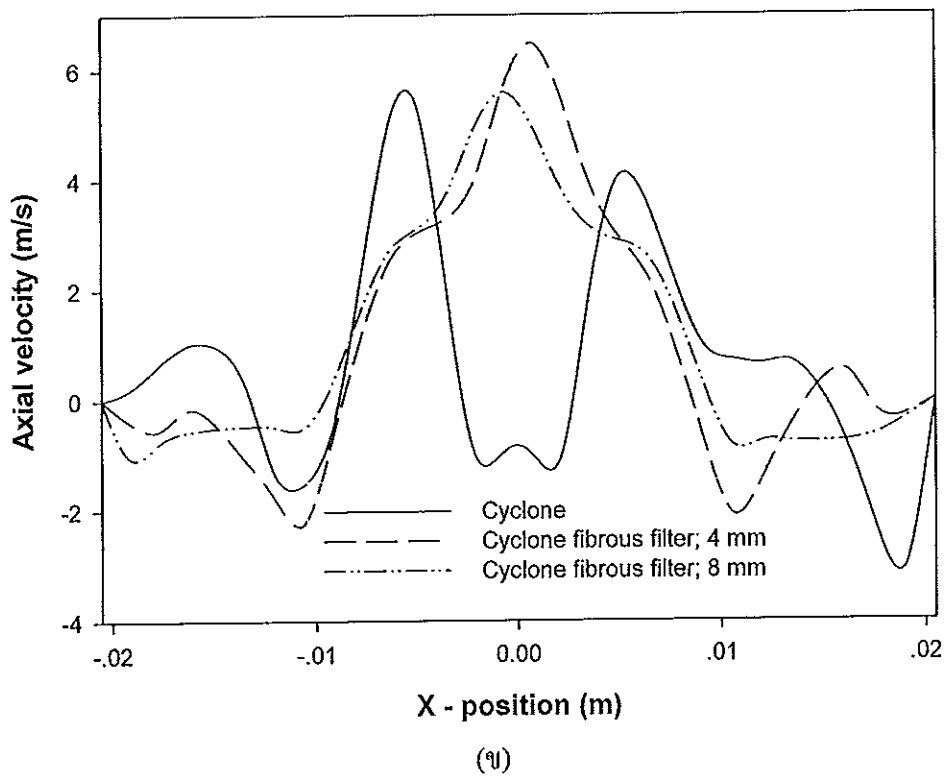
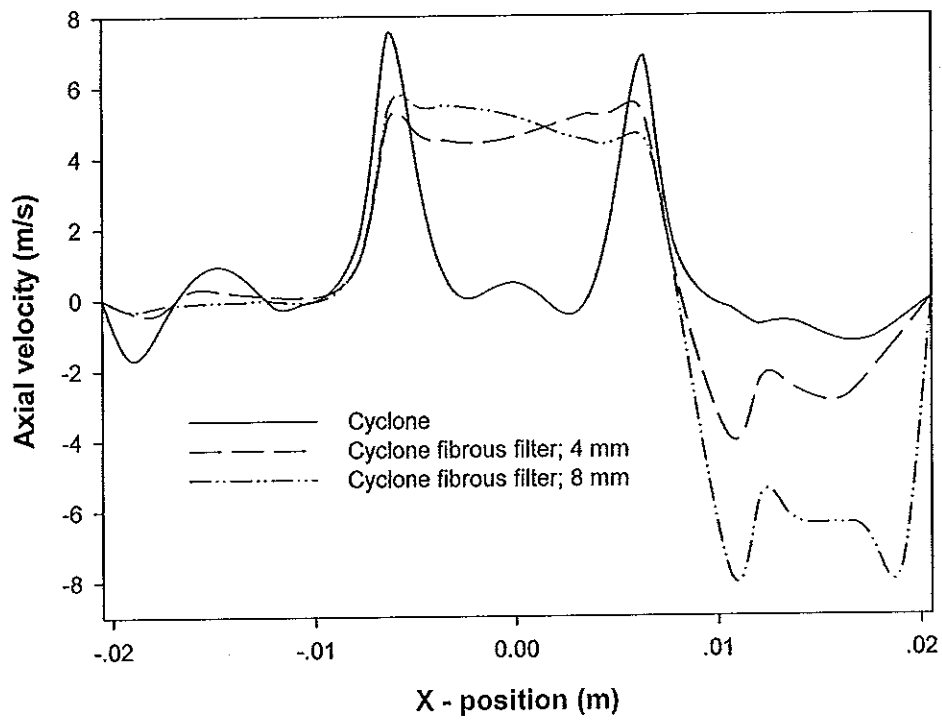
ผลของความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm แสดงในรูปที่ 6.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s พบว่าการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนมีทิศทางการไหลของกระแสอากาศมีทั้งในทิศทางไหลขึ้นและลง โดยบริเวณผนังของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์จะเคลื่อนที่ในทิศทางลงสู่ด้านล่าง ส่วนบริเวณแนวแกนกลางการไหลมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ในทิศทางขึ้นสู่ด้านบน แต่บริเวณแนวแกนของท่อทางออกนั้นจะมีความเร็วในแนวแกนสูงกว่าของไซโคลน เนื่องจากบริเวณใต้ท่อทางออกกับส่วนกรวยของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ การไหลของกระแสอากาศค่อนข้างปั่นป่วนในบริเวณนี้มาก่อนที่กระแสอากาศจะบีบตัวเคลื่อนที่สู่ด้านบน ซึ่งลักษณะการไหลที่ปั่นป่วนส่งผลเสียกับต่อการแยกอนุภาคออกจากกระแสอากาศ ยิ่งคงทำให้อนุภาคติดไปกับกระแสอากาศเคลื่อนที่ออกสู่ด้านบน จากลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่บริเวณผนังของไซโคลนจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่าง ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กก็จะถูกดักด้วยเส้นใยไฟเบอร์ นอกจากนี้รูปแบบการกระจายความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ที่ความเร็วอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) มีรูปแบบเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ แต่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ก็จะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย

ผลของความเร็วในแนวแกนในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm ที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m และตัดผ่านครึ่งของเส้นใยไฟเบอร์ (รูปที่ 6.6) แสดงในรูปที่ 6.13 (ก) และ (ข) พบว่าความเร็วในแนวแกนมีรูปแบบเปลี่ยนไปมีการกระจายตัวไม่เหมือนกับไซโคลน เนื่องการติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์ภายในท่อทางออกของไซโคลน และลักษณะของความเร็วที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m นั้นมีแนวโน้มการกระจายความเร็วในแนวแกนไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ตำแหน่งกึ่งกลางในแนวรัศมีไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และ 8 mm ความเร็วในแนวแกนจะมีค่าสูงกว่าของไซโคลน เนื่องมาจากการลักษณะการไหลหมุนวนของกระแสอากาศในไซโคลนมีจำนวนรอบมากกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ กว่าที่จะเคลื่อนที่จนถึงแกนกลางจึงทำให้ความเร็วลดลง เป็นผลให้ความเร็วในแนวแกนบริเวณแกนกลางมีค่าต่ำกว่าลักษณะของการกระจายความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ที่เกิดขึ้นนี้ อนุภาคขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างได้น้อยกว่าไซโคลน สืบเนื่องมาจากรูปแบบของการไหลปั่นป่วนบริเวณระหว่างใต้ท่อทางออกกับส่วนกรวยของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ และบริเวณใกล้กับผนังท่อทรงกระบอกของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ทั้งสองข้างที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ

$z = 0.05$ m ค่าของความเร็วในแนวแกนมีค่าลดลง ซึ่งตำแหน่งที่ $z = 0.01$ m ที่ผนังด้านขวามีความเร็วในแนวแกนลดลงมากกว่าที่ตำแหน่ง $z = 0.05$ m เนื่องจากบริเวณนั้นมีเส้นใยไฟเบอร์ โดยไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm มีค่าความเร็วในแนวแกนต่ำกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm เนื่องจากความยาวครีบของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ขวางกระไหลของกระแสอากาศมากกว่า



รูปที่ 6.12 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm (ข) เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm

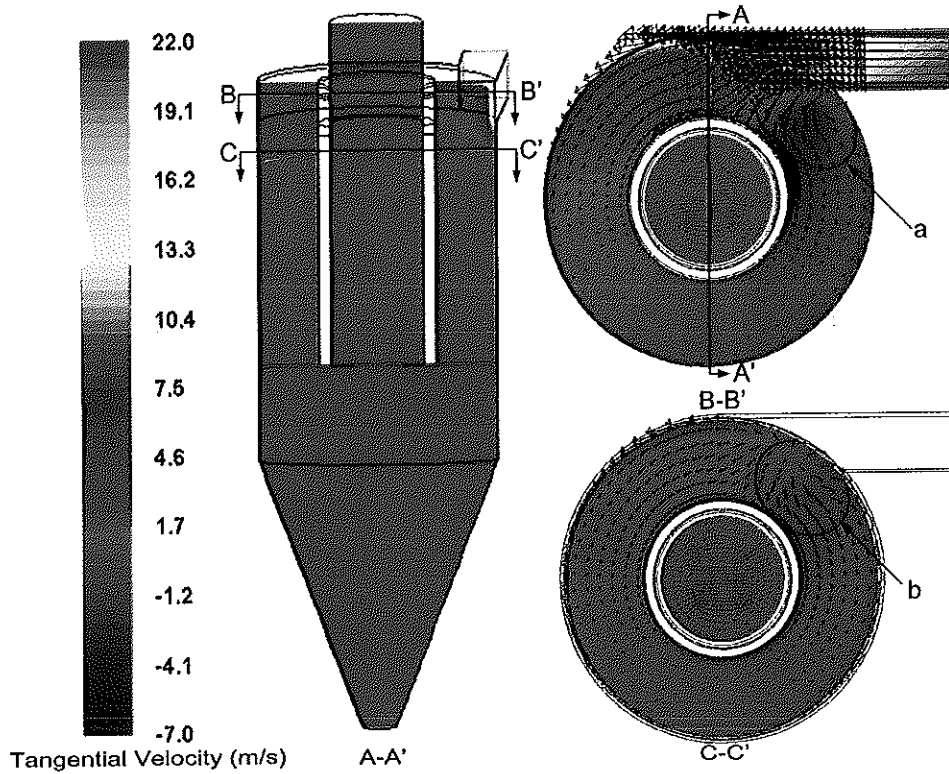


รูปที่ 6.13 โปรไฟล์ความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์
ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m

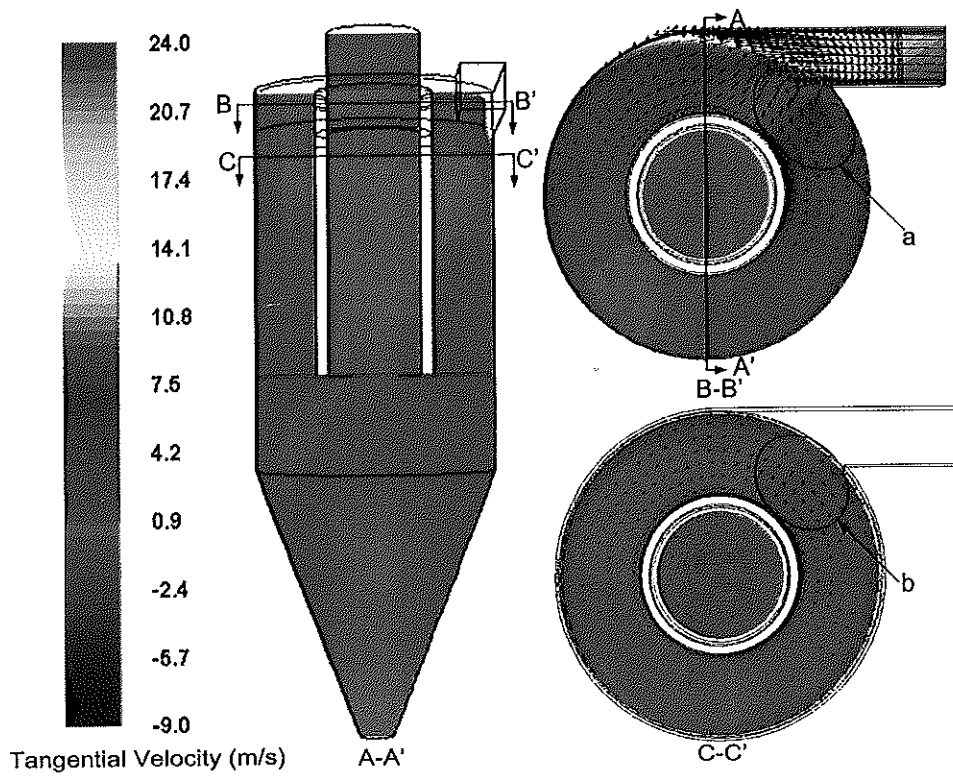
6.3.2 ความเร็วในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส

ความเร็วในแนวสัมผัส

ผลความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g แสดงในรูปที่ 6.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s พบว่าการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g มีรูปแบบเหมือนกัน คือจะมีค่าสูงที่สุดบริเวณที่ช่องทางเข้า เมื่อกระแสอากาศชนเส้นใยกรองจะทำให้ความเร็วลดลงอย่างรวดเร็วจนทั่วบริเวณไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส สังเกตได้จากรูปที่ 6.14 (ก) และ (ข) ที่หน้าตัด B-B' และพบว่าเมื่อกระแสอากาศไหลเข้ามาที่ทางเข้าของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส แล้วปะทะกับเส้นใยสแตนเลสทำให้การกระจายความเร็วเปลี่ยนรูปแบบไป คือ ความเร็วกระจายออก 2 ทิศทางออกไปทางด้านข้างก่อนที่จะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างดังรูปที่ 6.14 (ก) และ (ข) ที่หน้าตัด B-B' ที่ตำแหน่ง a และ รูปที่ 6.14 (ก) และ (ข) ที่หน้าตัด C-C' ตำแหน่ง b ทำให้อนุภาคขนาดเล็กมีโอกาสที่จะถูกดักโดยเส้นใยกรองมากขึ้น แต่จะไม่ถูกดักจับด้วยกลไกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศนั้นไม่ได้ไหลวนเป็นเกลียวไปตามผนังของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส นอกจากนั้นรูปแบบการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสที่ความเร็วอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) มีรูปแบบเหมือนกับความเร็ว 19.90 m/s ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ แต่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความเร็วในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสก็จะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย



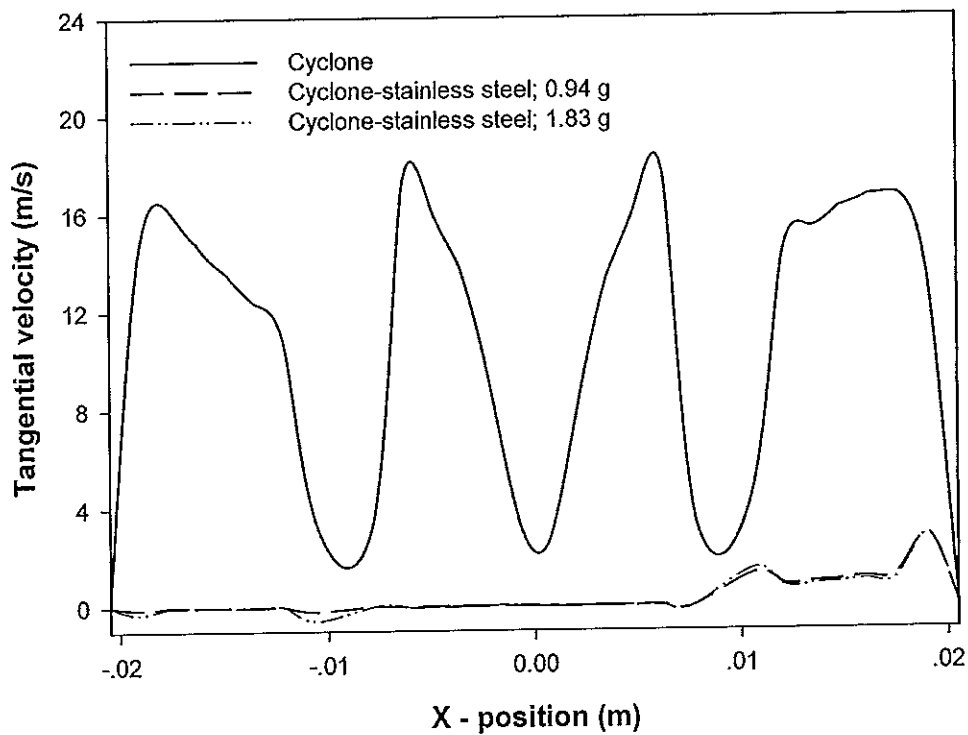
(ก)



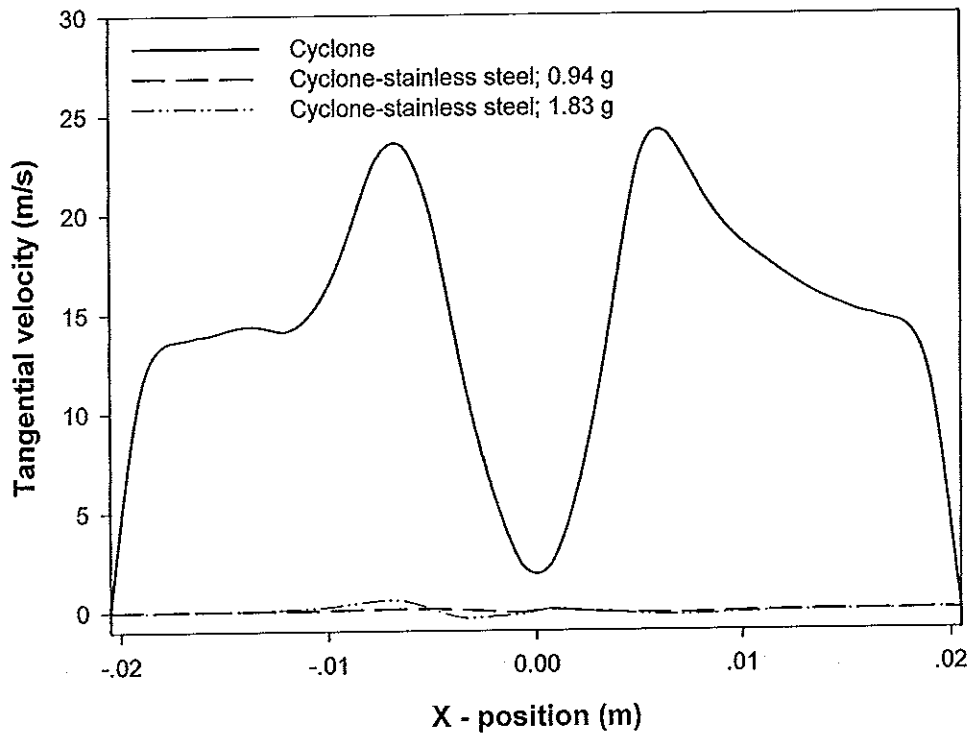
(ข)

รูปที่ 6.14 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสเตนเลส ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยสเตนเลส 0.94 g (ข) เส้นใยสเตนเลส 1.83 g

ผลของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g ที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m และตัดผ่านเส้นใยสแตนเลส (รูปที่ 6.6) แสดงในรูปที่ 6.15 (ก) และ (ข) พบว่าที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m ลักษณะการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g คล้ายกัน จากการนำเส้นใยสแตนเลสบรรจุภายในไซโคลนทำให้การกระจายความเร็วในแนวสัมผัสเปลี่ยนรูปแบบจากไซโคลนมาก เนื่องจากเส้นใยสแตนเลสบรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออก ทำให้ช่องว่างน้อยมาก เมื่อกระแสอากาศไหลมาจากทางท่อทางเข้าของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส แล้วชนกับเส้นใยสแตนเลสความเร็วจึงลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสมีค่าน้อยมาก โดยในตำแหน่งแนวรัศมีความเร็วในแนวสัมผัสนั้นเกือบเป็นเส้นตรงทั้งที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m และลักษณะการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามหลักของความเร็วในแนวสัมผัสในไซโคลนทั่วไป แต่ความเร็วในแนวสัมผัสที่ลดลงทำให้ไม่มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนั้นเกิดขึ้น แต่เป็นผลดีกับการดักจับอนุภาคนาขนาดเล็ก เพราะความเร็วที่ต่ำจะทำให้อนุภาคนาขนาดเล็กถูกดักด้วยกลไกการแพร่ในเส้นใยสแตนเลส



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.15 โปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส
ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m

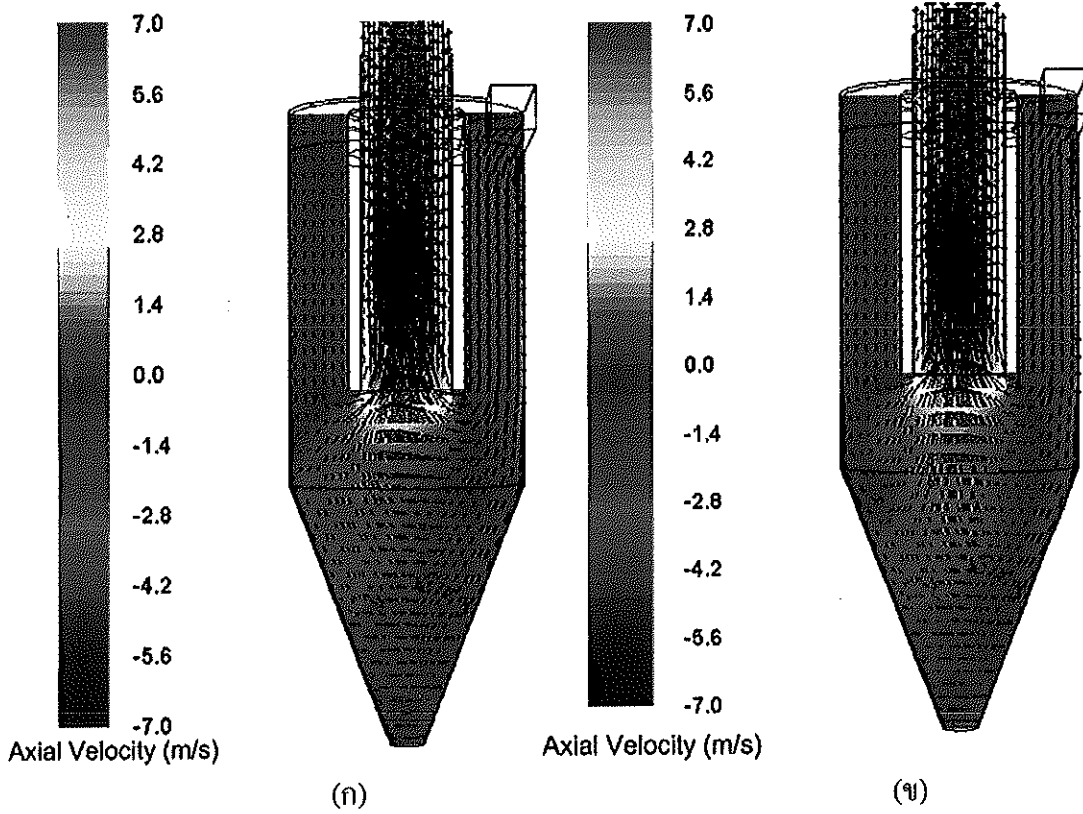
ความเร็วในแนวแกน

ผลความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g แสดงในรูปที่ 6.16 (ก) และ (ข) ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s พบว่าการกระจายความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g มีรูปแบบเหมือนกัน คือมีทิศทางการไหลของกระแสอากาศทั้งในทิศทางไหลขึ้นและลง โดยบริเวณผนังของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสกระแสอากาศจะเคลื่อนที่ในทิศทางลงสู่ด้านล่าง ส่วนบริเวณแนวแกนตรงบริเวณท่อทางออกกระแสอากาศมีจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งบริเวณแนวแกนของท่อทางออกนั้นจะมีความเร็วในแนวแกนสูงกว่าไซโคลน เนื่องจากการบีบตัวของกระแสอากาศใต้เส้นใยสแตนเลสที่จะพยายามเคลื่อนออกสู่ด้านบน จากการกระจายความเร็วในแนวแกนในลักษณะนี้อนุภาคจะถูกดักด้วยเส้นใยสแตนเลสเป็นส่วนใหญ่ แต่กลไกของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนั้นเป็นส่วนน้อยเพราะการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศไม่มีลักษณะไหลวน จึงไม่สามารถทำให้อนุภาคหลุดออกจากกระแสอากาศได้นอกจากนั้นรูปแบบการกระจายความเร็วในแนวแกนภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสที่ความเร็วอื่น ๆ (3.32, 6.63, 9.95, 13.27, และ 16.59 m/s) มีรูปแบบเหมือนกับที่ความเร็ว 19.90 m/s

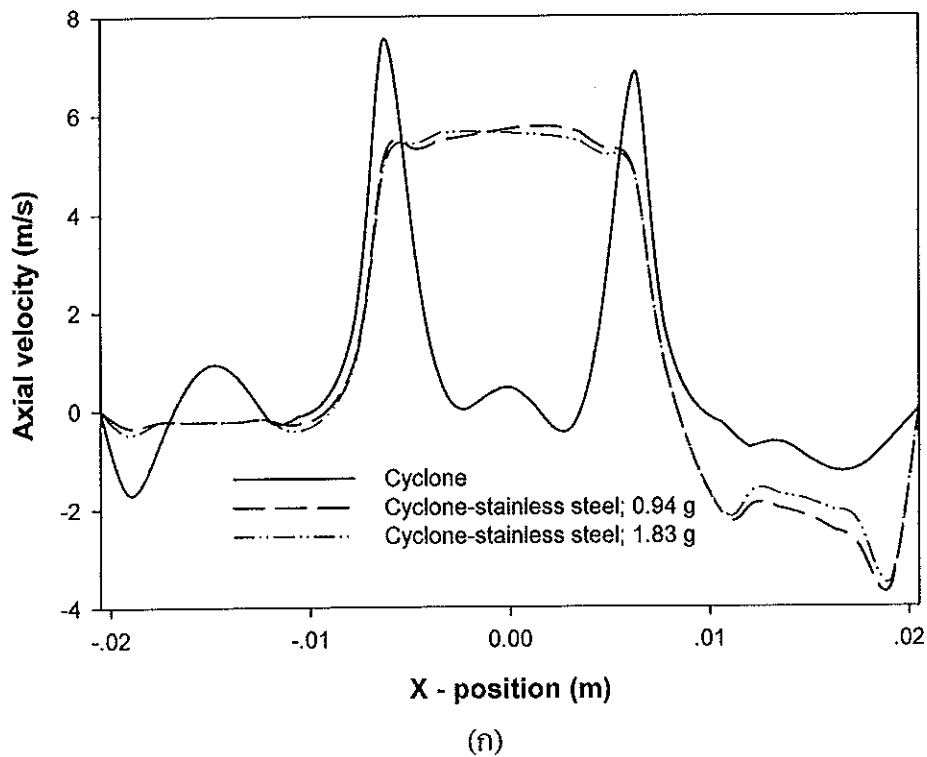
ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ แต่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วที่ป้อนเข้าไป เมื่อความเร็วทางเข้ามีค่าสูงขึ้นค่าความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสก็จะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย

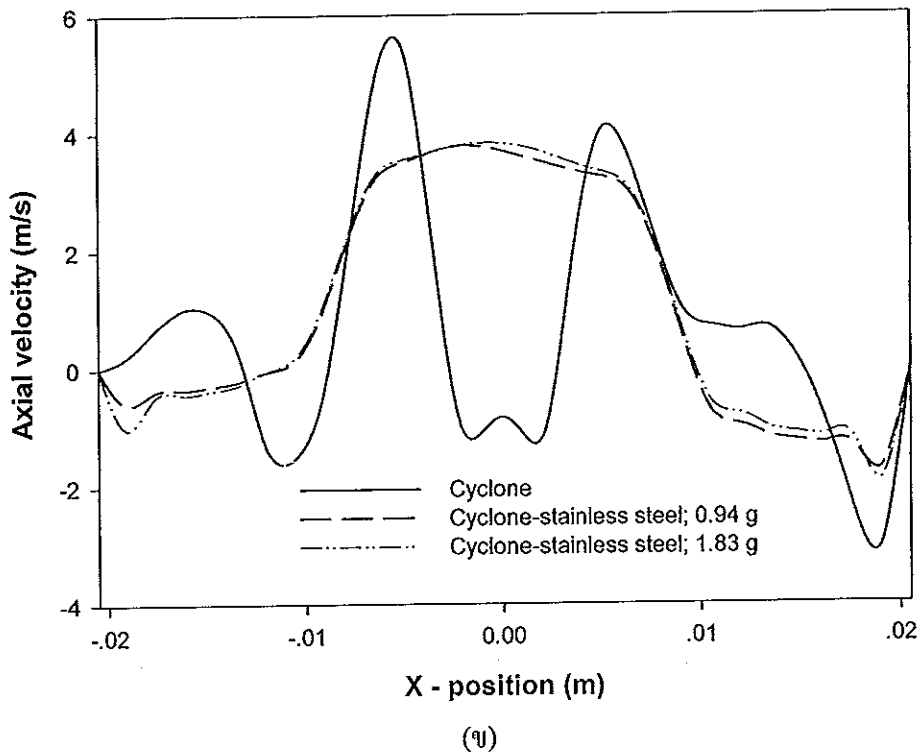
ผลของความเร็วในแนวแกนในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g และ 1.83 g ที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m และตัดผ่านเส้นใยสแตนเลส (รูปที่ 6.6) แสดงในรูปที่ 6.17 (ก) และ (ข) พบว่าการกระจายความเร็วในแนวแกนที่เกิดขึ้นของทั้งสองตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m มีรูปแบบเหมือนกัน ความเร็วในแนวแกนจะมีค่าสูงที่ช่วงรัศมี $x = -0.01$ m ถึง $x = 0.01$ m หรือภายในช่องทางออกซึ่งลักษณะคล้ายกับไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ เนื่องจากการบีบตัวของกระแสอากาศใต้เส้นใยสแตนเลสจะเคลื่อนที่สู่ด้านบนดังคำอธิบายก่อนหน้านี้ จากลักษณะการกระจายตัวความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยกรอง อนุภาคก็จะถูกดักด้วยเส้นใยสแตนเลส เนื่องจากการบรรจุเส้นใยสแตนเลสระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลน และผนังด้านนอกของช่องทางออก ทำให้มีปริมาตรของเส้นใยสแตนเลสมากจึงทำให้ดักจับอนุภาคได้มาก และมีอนุภาคบางส่วนไหลไปกับกระแสอากาศบริเวณแนวแกนช่องทางออกของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสเคลื่อนที่ในทิศทางขึ้นด้านบน และบริเวณใกล้กับผนังท่อทรงกระบอกทั้งสองข้างของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m ค่าของความเร็วในแนวแกนมีค่าลดลง ซึ่งตำแหน่งที่ $z = 0.01$ m ความเร็วในแนวแกนมีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่ง $z = 0.05$ m เนื่องจากบริเวณนั้นมีเส้นใยสแตนเลส

จากผลของความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยกรองที่เกิดขึ้น สรุปได้ว่าความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับความเร็วในแนวแกนทำให้สูญเสียกลไกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทั้ง 2 กรณี แต่กรณีไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์สูญเสียน้อยกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ดังแสดงในรูปที่ 6.2, 6.3 และตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.16 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s (ก) เส้นใยสแตนเลส 0.94 g (ข) เส้นใยสแตนเลส 1.83g

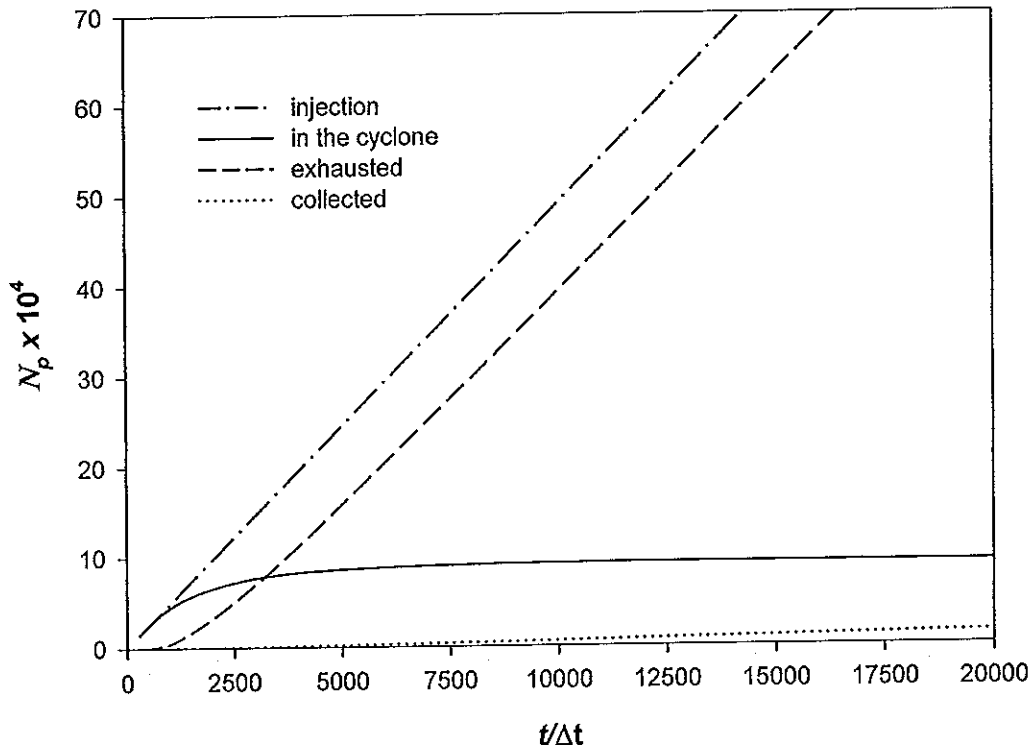




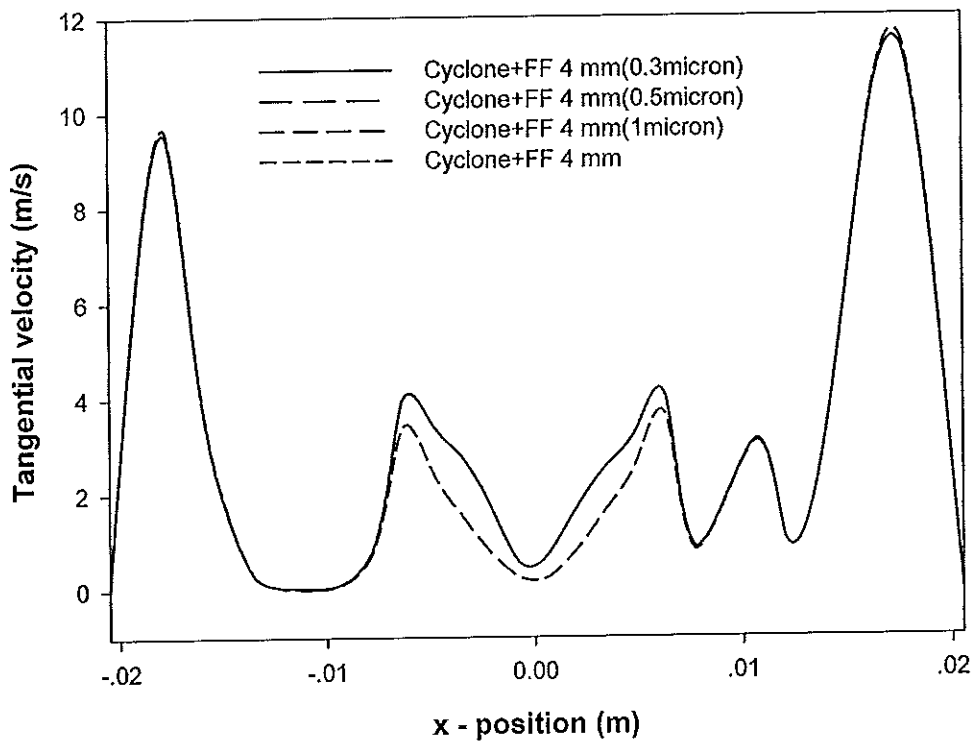
รูปที่ 6.17 โปรไฟล์ความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส
ที่ความเร็ว 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง (ก) $z = 0.01$ m (ข) $z = 0.05$ m

6.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง

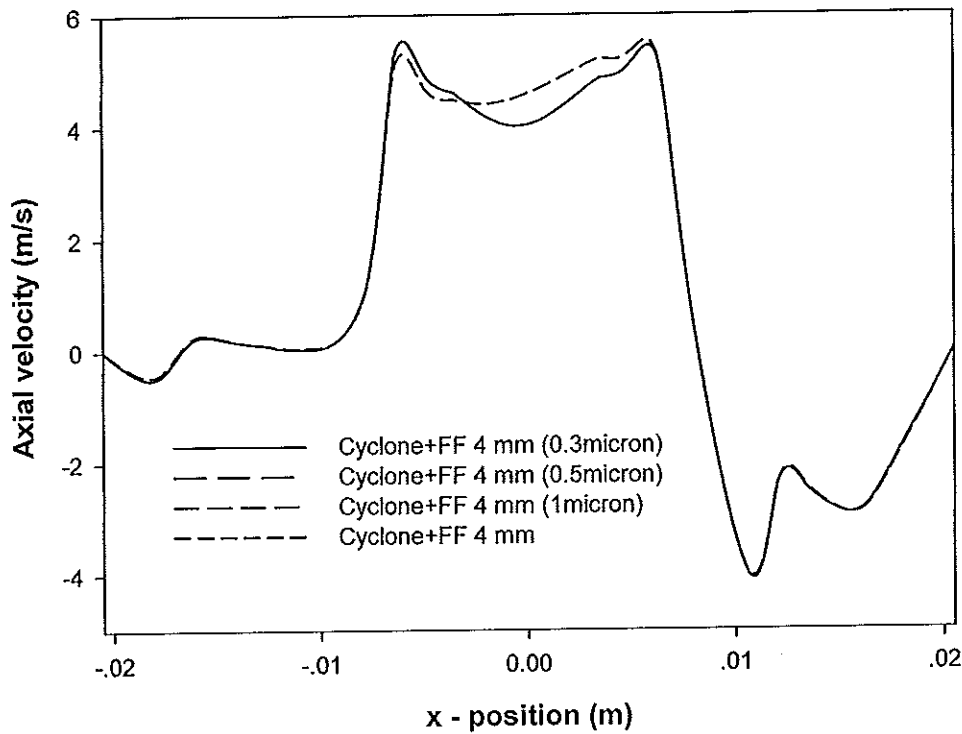
ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลน-เส้นใยกรองโดยการจำลอง เนื่องจากไม่สามารถกำหนดให้เส้นใยกรองในแบบจำลองให้มีการเรียงตัวได้เหมือนกับของจริง จึงเป็นข้อจำกัดในการศึกษาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลน-เส้นใยกรองของงานวิจัยนี้ แต่ได้ทำการจำลองโดยการปล่อยอนุภาคเข้าไปในไซโคลน-เส้นใยกรองอย่างต่อเนื่องจนจำนวนอนุภาคที่อยู่ในไซโคลน-เส้นใยกรองมีจำนวนคงที่ ดังรูปที่ 6.18 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์จากความเร็วในแนวสัมผัส และความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m (รูปที่ 6.6) เพื่ออธิบายเหตุผลของประสิทธิภาพการดักจับของไซโคลน-เส้นใยกรองที่ได้จากการทดลอง [4] ซึ่งความเร็วทั้งสองแนวนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดักจับของไซโคลน-เส้นใยกรอง จากผลการทดลองพบว่า ไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm และไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm และประสิทธิภาพการดักจับเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคและความเร็วเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.18 จำนวนของอนุภาคในไซโคลนในแต่ละเวลา



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.19 โปรไฟล์ความเร็วในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ความเร็ว 19.90 m/s ที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m (ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน

จากงานวิจัยของ Sangkhamanee et al. [4] ได้ทดลองวัดประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ $1 \mu\text{m}$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์เมื่อมีอนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ $1 \mu\text{m}$ ติดไปกับกระแสดอากาศว่าจะทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแกนในไซโคลน-เส้นใยกรองเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จากรูปที่ 6.19 (ก) และ (ข) เป็นผลของความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s ซึ่งมีอนุภาคไหลผสมกับกระแสดอากาศที่อนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ $1 \mu\text{m}$ และกรณีไม่มีอนุภาคผสมกับกระแสดอากาศ พบว่าความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อมีอนุภาคติดมากับกระแสดอากาศ และขนาดอนุภาคไม่มีผลทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนเกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าอนุภาคจะมีเส้นทางการเคลื่อนที่ตามกระแสดอากาศเหมือนกับรูปที่ 6.2 และ 6.3 จากการติดตั้งเส้นใยกรองในไซโคลนทำให้ประสิทธิภาพการดักจับเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วในไซโคลน-เส้นใยกรองลดลงทำให้กลไกของเส้นใยกรองดักจับอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกลไกของเส้นใยกรองนั้นจะประกอบไปด้วยกลไกการแพร่ (diffusion) การสกัดกั้นโดยตรง (interception) และการ

กระทบด้วยแรงความเฉื่อย (inertial impaction) กลไกทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วและขนาดอนุภาค จากการทดลองของ Otani et al. [45] ที่ทำการศึกษากลไกการดักจับอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วย เส้นใยกรองสแตนเลสชนิดเดียวกัน พบว่าการดักจับของอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ในเส้นใยกรอง นั้น จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อความเร็ว ขนาดของอนุภาค หรือ Peclet number (Pe) มีค่าลดลง ส่วน การกระทบด้วยแรงเฉื่อยประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็ว ขนาดอนุภาคหรือค่า Stokes number (Stk) เพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งความเร็วและขนาดอนุภาคมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการดักจับและ เป็นตัวบ่งบอกถึงกลไกการดักจับที่เกิดขึ้นของเส้นใยกรอง

ความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในเส้นใยกรองภายในไซโคลนมีค่าลดลงเมื่อกระแสอากาศ เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยกรอง ดังแสดงในตารางที่ 6.2 พบว่าความเร็วในเส้นใยสแตนเลสมีค่าต่ำกว่า เส้นใยไฟเบอร์ และตารางที่ 6.3 และ 6.4 แสดงค่า Stk และ Pe ซึ่งทั้ง 2 ค่าของไซโคลน-เส้นใย สแตนเลสมีค่าต่ำกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ เมื่อนำค่า Pe และ Stk ทำการคำนวณ ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเส้นใยเดี่ยว (single-fiber efficiency) ด้วยกลไกการแพร่และการ กระทบด้วยแรงเฉื่อย พบว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ในไซโคลน-เส้น ใยสแตนเลสมีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ แสดงในตารางที่ 6.5-6.6 เนื่องจากค่า Pe มีค่าต่ำ กว่า ซึ่งค่า Pe เป็นอัตราส่วนระหว่างการพาและการแพร่ของของไหลที่กระทำกับอนุภาค ยิ่งค่า Pe มีค่าต่ำนั้นหมายถึงว่าการแพร่จะเกิดขึ้นมากกว่าการพา จึงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับ อนุภาคด้วยกลไกการแพร่ของเส้นใยเดี่ยวที่คำนวณได้ของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสมีค่าสูงกว่า ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์

ส่วนประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อยใน ไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์มีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส แสดงในตารางที่ 6.7-6.8 เนื่องจาก ค่า Stk มีค่าสูงกว่า ซึ่งค่า Stk เป็นอัตราส่วนระหว่างความเฉื่อยและความหนืดของของไหลที่ กระทำกับอนุภาค ยิ่งค่า Stk มีค่าสูงนั้นหมายถึงว่าความเฉื่อยมีผลมากกว่าความหนืด เมื่อเทียบค่า Stk ของไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์มีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส จึงทำให้ประสิทธิภาพ การดักจับอนุภาคด้วยกลไกการกระทบด้วยของเส้นใยเดี่ยวที่คำนวณได้ของไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์มีค่าสูงกว่าไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสค่อนข้างมาก จากผลดังกล่าวจึงสามารถสรุป ได้ว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคที่เพิ่มขึ้นของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสเป็นกลไก การแพร่เป็นส่วนใหญ่ เพราะความเร็วในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสมีค่าลดลงมาก จึงไม่สามารถ ทำให้อนุภาคหลุดออกจากกระแสอากาศได้ เป็นผลให้กลไกในการดักจับอนุภาคด้วยแรง เหวี่ยงหนีศูนย์กลางและกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อยของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสที่เกิดขึ้น นั้นน้อยมากหรือแทบจะไม่มีเลย ส่วนประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคที่เพิ่มขึ้นของไซโคลน-เส้น

ใยไฟเบอร์นั้นเป็น แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และการกระทบด้วยแรงความถี่มากกว่ากลไกจากการแพร่

สรุปจากการติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์เป็นแบบครึ่ง 4 ครีบริบที่ต่อทางออกภายในไซโคลน ทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนเปลี่ยนรูปแบบไปเล็กน้อย ส่งผลดีในการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการกระทบด้วยแรงเหวี่ยงมากกว่าการแพร่ และยังมีกลไกจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางลักษณะการไหลหมุนวนของกระแสอากาศ ซึ่งความดันสูญเสียนั้นเกิดขึ้นนั้นเกิดจากการไหลหมุนวนของกระแสอากาศและแรงต้านการไหลจากเส้นใยไฟเบอร์ ส่วนการติดตั้งเส้นใยสแตนเลสบรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไซโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกของไซโคลน ทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสมีต่ำกว่าความเร็วในแนวแกนมาก จึงทำให้การไหลแบบหมุนวนของกระแสอากาศที่เกิดขึ้นภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสที่นั่นแทบจะไม่เกิดขึ้นเลยเมื่อเทียบกับไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ แต่ส่งผลดีในการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่เป็นอย่างมาก ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลน-เส้นใยสแตนเลสเพิ่มมากขึ้น และความดันสูญเสียนั้นเป็นผลจากการขวางการไหลของเส้นใยสแตนเลสที่มีปริมาตรที่บรรจุในไซโคลนค่อนข้างมาก

ตารางที่ 6.2 ความเร็วเฉลี่ยในไซโคลนและเส้นใยกรอง

ความเร็วทางเข้าในไซโคลน และไซโคลน-เส้นใยกรอง (m/s)	ความเร็วเฉลี่ย ในไซโคลน (m/s)	ความเร็วเฉลี่ยในเส้นใยกรอง (m/s)			
		เส้นใยไฟเบอร์		เส้นใยสแตนเลส	
		4 mm	8 mm	0.94 g	1.83 g
13.27	9.73	4.17	2.29	0.75	0.74
19.90	15.79	6.46	3.66	1.14	1.12

ตารางที่ 6.3 ค่า Stokes number และ Peclet number ที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s

ชนิด	<i>Stk</i>			<i>Pe</i>		
	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm
ไซโคลน	0.29	0.68	2.38	23731.71	77964.74	355109.49
ไซโคลน-เส้นใย	0.12	0.29	1.02	10170.73	33413.46	152189.78
ไฟเบอร์ 4 mm						
ไซโคลน-เส้นใย	0.07	0.16	0.56	5585.37	18349.36	83576.64
ไฟเบอร์ 8 mm						
ไซโคลน-เส้นใย	0.02	0.05	0.18	1829.27	6009.62	2737.26
สแตนเลส 0.94 g						
ไซโคลน-เส้นใย	0.02	0.05	0.18	1804.88	5929.49	27007.30
สแตนเลส 1.83 g						

ตารางที่ 6.4 ค่า Stokes number และ Peclet number ที่ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s

ชนิด	<i>Stk</i>			<i>Pe</i>		
	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm
ไซโคลน	0.46	1.10	3.86	38512.20	126522.44	576277.37
ไซโคลน-เส้นใย	0.19	0.45	1.58	15756.10	51762.82	235766.42
ไฟเบอร์ 4 mm						
ไซโคลน-เส้นใย	0.11	0.26	0.90	8926.83	29326.92	133576.64
ไฟเบอร์ 8 mm						
ไซโคลน-เส้นใย	0.03	0.08	0.28	2780.49	9134.36	41605.84
สแตนเลส 0.94 g						
ไซโคลน-เส้นใย	0.03	0.08	0.27	2731.71	8974.36	40875.91
สแตนเลส 1.83 g						

ตารางที่ 6.5 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ของเส้นใยเดี่ยวที่ความเร็วทางเข้า
13.27 m/s

ขนาด อนุภาค (μm)	ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ของเส้นใยเดี่ยว (%)			
	ไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์ 4 mm	ไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์ 8 mm	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 0.94 g	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 1.83 g
0.30	0.43	0.64	1.34	1.35
0.50	0.19	0.29	0.61	0.61
1.00	0.07	0.10	0.22	0.22

ตารางที่ 6.6 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ของเส้นใยเดี่ยวที่ความเร็วทางเข้า
19.90 m/s

ขนาด อนุภาค (μm)	ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกการแพร่ของเส้นใยเดี่ยว (%)			
	ไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์ 4 mm	ไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์ 8 mm	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 0.94 g	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 1.83 g
0.30	0.32	0.46	1.01	1.02
0.50	0.14	0.21	0.46	0.46
1.00	0.05	0.08	0.17	0.17

ตารางที่ 6.7 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกกระทบด้วยแรงเฉื่อยของเส้นใยเดี่ยวที่
ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s

ขนาด อนุภาค (μm)	ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกกระทบด้วยแรงเฉื่อยของเส้นใยเดี่ยว (%)			
	ไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์ 4 mm	ไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์ 8 mm	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 0.94 g	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 1.83 g
0.30	0.07	0.04	0.01	0.02
0.50	0.44	0.24	0.07	0.10
1.00	5.89	3.23	0.91	1.34

ตารางที่ 6.8 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกกระทบด้วยแรงเฉื่อยของเส้นใยเดี่ยวที่
ความเร็วทางเข้า 19.90 m/s

ขนาด อนุภาค (μm)	ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยกลไกกระทบด้วยแรงเฉื่อยของเส้นใยเดี่ยว (%)			
	ไซโคลน-เส้นใยไฟ เบอร์ 4 mm	ไซโคลน-เส้นใย ไฟเบอร์ 8 mm	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 0.94 g	ไซโคลน-เส้นใย สแตนเลส 1.83 g
0.30	0.11	0.06	0.02	0.02
0.50	0.69	0.39	0.11	0.16
1.00	9.12	5.17	1.39	2.03

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการไหลภายในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยกรอง ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อค่าหาความดันสูญเสีย ความเร็วในแนวสัมผัส ความเร็วแนวแกน และประสิทธิภาพการดักจับเปรียบเทียบกับผลการทดลองและอธิบายผลที่เกิดขึ้น ซึ่งเลือกใช้แบบจำลองการไหล Reynolds Stress Model (RSM) โดยใช้การประมาณค่าภายในด้วยระเบียบวิธีแบบ QUICK ร่วมกับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE จากนั้นจึงนำกระบวนการดังกล่าวทำนายพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลน-เส้นใยกรองที่ความเร็วทางเข้าต่าง ๆ และการไหลแบบสองเฟส ที่มีอนุภาคผสมกับกระแสอากาศไหลภายในไซโคลน-เส้นใยกรอง

7.1.1 ไซโคลน

ความดันสูญเสียในไซโคลนเพิ่มเมื่อความเร็วทางเข้าของไซโคลน และจำนวนกริดที่ 67,438 กริดให้ผลการจำลองความดันสูญเสียใกล้เคียงกับทดลองมากที่สุดเมื่อเทียบกับจำนวนกริดที่ 52,628, 83,454 และ 99,470 กริด ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนในไซโคลนมากที่สุดที่ตำแหน่ง $z = 0.01$ m และ $z = 0.05$ m อยู่ที่รัศมี $x = -0.06$ m และ $x = 0.06$ m ซึ่งการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนในไซโคลนในงานวิจัยเหมือนกับไซโคลนทั่วไป และการจำลองการไหลของอนุภาคภายในไซโคลน ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลนในงานวิจัยมีความใกล้เคียงกับการทดลองของ Sangkhamanee et al. [4] มีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎีของ Crawford [31] ซึ่งขนาดตัดของผลการจำลองที่ความเร็ว 13.27 และ 19.9 m/s คือ 1.7 และ 1.4 μm ตามลำดับ

7.1.2 ไชโคลน-เส้นใยกรอง

จากการจำลองการไหลภายในไชโคลน-เส้นใยกรอง โดยทำการติดตั้งเส้นใยกรอง 2 ชนิด คือ เส้นใยไฟเบอร์ (fibrous filter) และเส้นใยสแตนเลส (stainless steel) โดยทำการติดตั้ง 2 รูปแบบ คือ เส้นใยไฟเบอร์ติดตั้งเป็นแบบครึ่ง 4 ครีบ มีความยาวของครีบ 4 mm และ 8 mm ส่วนเส้นใยสแตนเลส บรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไชโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกมีน้ำหนัก 0.94 g และ 1.83 g พบว่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้น ไชโคลนมีค่าความดันสูญเสียมากที่สุดมีค่าเพียงเบนสูงสุดจากการทดลอง 17.6% รองลงมาคือ ไชโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g มีค่าเพียงเบนสูงสุดจากการทดลอง 5.1% ไชโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g มีค่าเพียงเบนสูงสุดจากการทดลอง 39.6% ไชโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm มีค่าเพียงเบนสูงสุดจากการทดลอง 57.6% และ ไชโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm มีค่าเพียงเบนสูงสุดจากการทดลอง 77.9% ตามลำดับ และจากการติดตั้งเส้นใยกรองภายในไชโคลนทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนในไชโคลน-เส้นใยกรองเปลี่ยนรูปแบบการกระจายตัว โดยความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าต่ำกว่าความเร็วในแนวแกนทำให้สูญเสียกลไกจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทั้ง 2 กรณี ซึ่งไชโคลน-เส้นใยไฟเบอร์สูญเสียน้อยกว่าไชโคลน-เส้นใยสแตนเลส ซึ่งเมื่อเทียบกับความเร็วในแนวสัมผัสในไชโคลน-เส้นใยไฟเบอร์กับไชโคลน มีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับไชโคลนแต่มีค่าต่ำกว่า แสดงว่าการไหลของกระแสอากาศในไชโคลน-เส้นใยไฟเบอร์เป็นลักษณะหมุนวน ยังคงมีกลไกจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และเมื่อเทียบกับความเร็วในแนวสัมผัสในไชโคลน-เส้นใยสแตนเลสกับไชโคลน มีค่าลดลงมากแสดงว่าการไหลของกระแสอากาศในไชโคลน-เส้นใยสแตนเลสไม่เป็นลักษณะหมุนวน จึงทำให้ไม่มีกลไกจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเหลืออยู่

จากผลการจำลองการไหลอนุภาคผสมกับกระแสอากาศความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีอนุภาคเคลื่อนที่ติดไปกับกระแสอากาศภายในไชโคลน-เส้นใยกรอง ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจากการติดตั้งเส้นใยไฟเบอร์เป็นแบบครึ่ง 4 ครีบ ทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนเปลี่ยนรูปแบบไปเล็กน้อย และค่าความเร็วลดลงซึ่งส่งผลดีทำให้กลไกการสกัดกั้นโดยตรงและการแพร่ของเส้นใยไฟเบอร์ดักจับอนุภาคง่ายขึ้น โดยทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไชโคลน-เส้นใยไฟเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งยังมีกลไกในการดักจับอนุภาคจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแต่น้อยกว่าไชโคลน ซึ่งกลไกการดักจับอนุภาคด้วยเส้นใยไฟเบอร์ภายในไชโคลนนั้นเป็นกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อยมากกว่ากลไกจากการแพร่ และจากการติดตั้งเส้นใยสแตนเลสที่บรรจุระหว่างผนังด้านในของตัวไชโคลนและผนังด้านนอกของท่อทางออกทำให้ความเร็วใน

แนวสัมผัสมีค่าต่ำความเร็วในแนวแกนและเปลี่ยนรูปแบบไปมาก ส่งผลดีทำให้กลไกการแพร่ของเส้นใยสแตนเลสดักจับอนุภาคง่ายขึ้น ซึ่งกลไกการดักจับอนุภาคด้วยเส้นใยสแตนเลสภายในไซโคลอนนั้นเป็นกลไกการแพร่มากกว่ากลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อย จึงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของไซโคลอน-เส้นใยสแตนเลสเพิ่มขึ้นมาก แต่กลไกในการดักจับอนุภาคจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนั้นมีน้อยมากเมื่อเทียบกับไซโคลอนและไซโคลอน-เส้นใยไฟเบอร์

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นในไซโคลอน-เส้นใยกรองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นผลดีในการอธิบายเหตุผลของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการไหลภายในไซโคลอน และทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง และลดเวลาในการออกแบบเป็นอย่างมาก เพื่อให้งานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพจึงมีข้อเสนอแนะและแนวทางสำหรับการวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

1. ควรจะทำการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์หลายตัวเป็นเครือข่าย (network) และการประมวลผลด้วยความเร็วสูง เพื่อลดเวลาในการคำนวณของแบบจำลอง
2. ในการจำลองการไหลในไซโคลอน ควรทำการสร้างกริดที่มีคุณภาพและการเยื้องตัวของกริดน้อยสุด ในลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (hexahedron) เพราะจะทำให้ผลเฉลยจะลู่เข้าหาคำตอบเร็วขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] นพภาพร พานิช. 2008. ฝุ่นละออง. สำนักงานคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. http://aqnis.pcd.go.th/basic/pollution_pm.htm (สืบค้นเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2011).
- [2] Karadimos, A.T. and Ocone, R.F. 2003. The effect of the flow field recalculation on fibrous filter loading: a numerical simulation. *Powder Technology* 137: 109– 119.
- [3] Namiki, N., Wu, C., Tekasakul, P., Emi, H. and Otani, Y. 2000. Collection performance of cyclone with unwoven fabrics attached to inner wall of outlet tube. Proceedings of the First Asian Particle Technology Symposium, Bangkok, Thailand (CD-ROM).
- [4] Sangkhamanee, M., Tekasakul, S., Tekasakul, P. and Otani, Y. 2010. Performance of a combined cyclone-filter aerosol collector. *Particulate Science and Technology* (accepted).
- [5] Gimbin, J.L., Chuah, T.G., Fakhru 'l-Razi, A., and Choong, Thomas S.Y. 2005. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study *Chemical Engineering and Processing* 44: 7–12.
- [6] Dirgo, J. 1988. Relationships between cyclone dimensions and performance. Doctoral Thesis, Havarad University.
- [7] Shepherd, C.B. and Lapple, C.E. 1939. Air pollution control: a design approach. In *Cyclones*, Cooper, C.D., Alley (Eds.), F.C., pp. 127–139. Woveland: Illinois.
- [8] Coker, A.K. 1993. Understand cyclone design. *Chemical Engineering and Processing* 28 :51–55.
- [9] Casal, J. and Martinez, J.M. 1983. A better way to calculate cyclone pressure drop. *Chemical Engineering* 90: 99.
- [10] Chuah, T.G., Gimbin, J.L. and Choong, Thomas S.Y. 2006. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics. *Powder Technology* 162: 126 – 132.
- [11] Wan, G., Sun, G., Xue, X. and Shi, M. 2008. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology* 183: 94–104.

- [12] วสันต์ ศรีเมือง. 2547 การจำลองระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [13] กัมปนาท แก้วปลั่ง. 2547. การจำลองการเคลื่อนที่ 3 มิติ ของอนุภาคเดี่ยว ตามการไหลแบบปั่นป่วนในก๊าซไซโคลนแบบเป่าลง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] Dirgo, J. and Leith, D. 1985. Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions. *Aerosol Science and Technology* 4: 401-414.
- [15] Yoshida, H. 1996. Three-dimensional simulation of air cyclone and particle separation by a revised-type cyclone. *Colloids and Surfaces* 109: 1-12.
- [16] ทรงฤทธิ์ ดันัชชวาล ปุณยศ วัลลิกุล และ บัณฑิต พุ่งธรรมสาร. 2545. การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลหมุนวนเทอร์บิวเลนซ์: กรณีเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนรอบแนวแกน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 2 (3).
- [17] Imao, S., Itod, M. and Harada, T. 1996. Turbulent characteristics of the flow in an axially rotating pipe. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 17: 444-451.
- [18] Xiang, R., Park, S.H. and Lee, K.W. 2001. Effects of cone dimension on cyclone performance. *Aerosol Science* 32: 549-561.
- [19] สามารถ พรเจริญ. 2546. การจับเก็บฝุ่นขนาดเล็กด้วยไซโคลนสกรับเบอร์. วิทยานิพนธ์มหาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [20] ฉัตรชัย นิยมม. 2546. หลักการง่าย ๆ แต่มีประสิทธิภาพกับการดักฝุ่นด้วยไซโคลน. *Mechanical Technology Magazine* 3(21): 70-83.
- [21] Puritex. 2008. ไซโคลน. <http://www.puritek.info/Klet%20Khwamru11.htm> (accessed July 3, 2008).
- [22] Ku, Y. and Tsai, C.J. 2001. On the theory of particle cutoff diameter and collection efficiency of cyclone. *Aerosol and Air Quality Research* 1: 47-56.
- [23] Lapple, C.E. 1950. Gravity and centrifugal separation. *Industrial Hygiene Quarterly* 11: 40-48.
- [24] Stairmand, C.J. 1951. Design and performance of cyclone separators. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 29: 356-573.

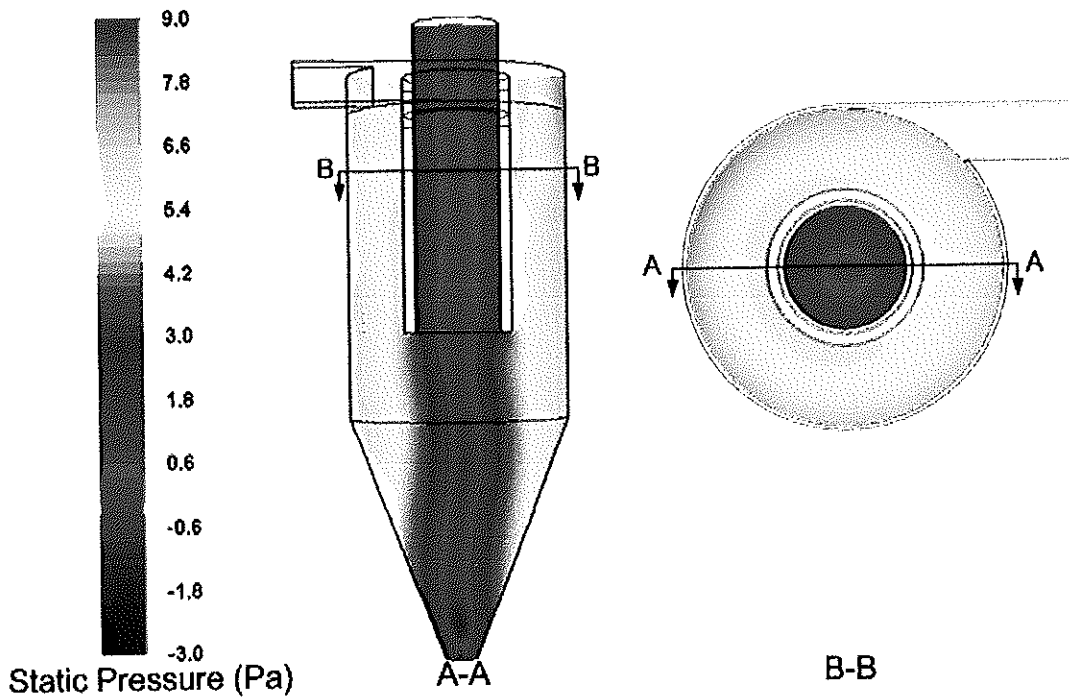
- [25] Barth, W. 1956. Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations. *Brennst Warme Kraft* 8: 1-9.
- [26] Iozia, D.L. and Leith, D. 1989. Effect of cyclone dimension on gas flow pattern and collection efficiency. *Aerosol Science and Technology* 10: 491-500.
- [27] ฉัตรชัย นิยมมล. 2548. การออกแบบไซโคลนดักฝุ่นเพื่อการควบคุมมลภาวะทางอากาศ. *เทคนิค เครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม* 21(244).
- [28] Leith, D. and Licht, W. 1972. The collection efficiency of cyclone type particle collectors: a new theoretical approach. *American Institute of Chemical Engineers Symposium Series* 126(68): 196-206.
- [29] Dietz, P.W. 1981. collection efficiency of cyclone separators. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 37(6): 888-892.
- [30] Li, E. and Wang, Y. 1989. A New collection theory of cyclone separators. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 35(4): 666-669.
- [31] Iozia, D.L. and Leith, D. 1990. The logistic function and cyclone fractional efficiency. *Aerosol Science and Technology* 12:598-606.
- [32] Crawford, M. 1976. *Air pollution control theory*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- [33] Shepherd, C. B. and Lapple, C. E. 1940. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors. *Industrial and Engineering Chemistry* 32: 1246-1248.
- [34] First, M. W. 1950. Fundamental factors in the design of cyclone dust collectors. PhD diss. Cambridge, Mass, Harvard University.
- [35] Alexander, R. M. 1949. Fundamentals of cyclone design and operation. *Proceedings - Australasian Institute of Mining and Metallurgy* 152-3: 203-228.
- [36] Stairmand, C. J. 1949. Pressure drop in cyclone separators. *Industrial and Engineering Chemistry* 16(B): 409-411.
- [37] Wang, L., Parnell, C. B., Shaw, B. W. and Lacey, R. E. 2006. A Theoretical approach for predicting number of turns and cyclone pressure drop. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 49(2): 491-503.
- [38] Hinds, W. C. 1999. *Aerosol technology*, 2nd ed. New York: Wiley.
- [39] Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H. 2006. *Fundamentals of fluid mechanics*, Wiley.

- [40] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. 1995. *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*, Pearson Prentice Hall.
- [41] Wang, B., Xu, D.L., Chu, K.W. and Yu, A.B. 2006. Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling* 30: 1326–1342.
- [42] อภิชาติ ธรรมอักษร ธนิต สวัสดิ์เสวี วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล มานะ อมรกิจบำรุง และรัชชชัย ชรินพานิชกุล. 2550. การจำลองระบบระบายอากาศชนิดไหลในแนวตั้งอย่างสม่ำเสมอโดยเทคนิคคำนวณพลศาสตร์ของไหล. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3, 23-25 พฤษภาคม 2550 กรุงเทพฯ ENETT2550-001.
- [43] FLUENT. 2009. *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. ANSYS Inc.
- [44] Slack, M. D., Prasad, R., Bakker, O. A. and Boysan, F. 2000. Advances in cyclone modelling using unstructured grids. *Institution of Chemical Engineers* 78: 1098-1104.
- [45] Otani, Y., Eryu, K., Furuuchi, M., Tajima, N. and Tekasakul, P. 2007. Inertial classification of nanoparticles with fibrous filters. *Aerosol and Air Quality Research*. 7(3): 343-352.

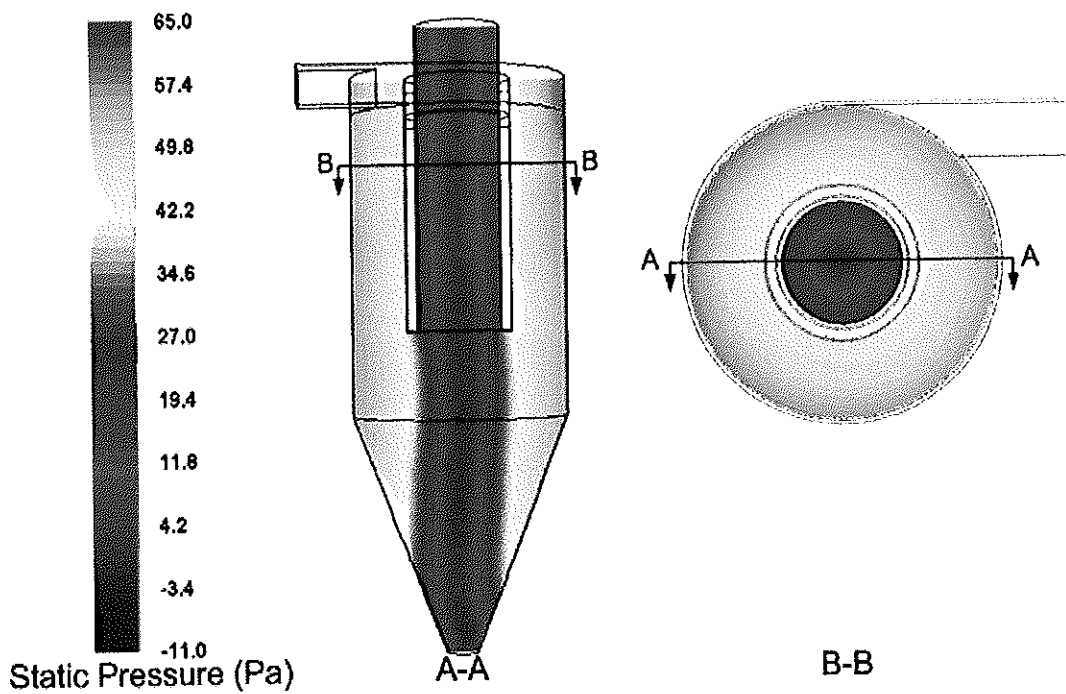
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

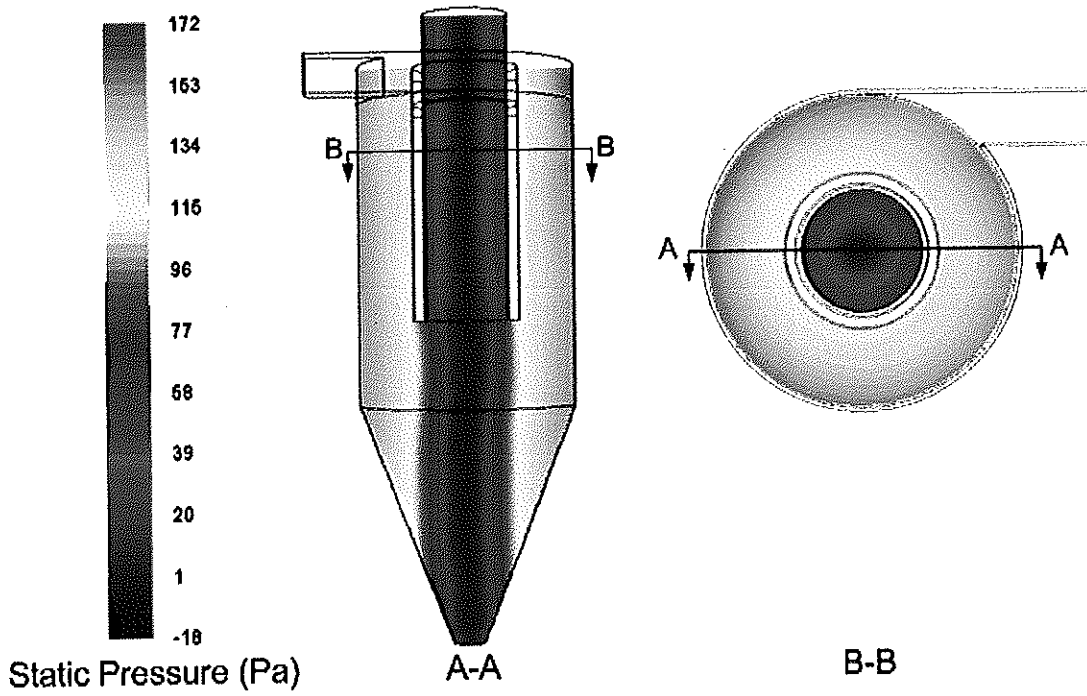
รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนและไซโคลน-เส้นใยกรอง



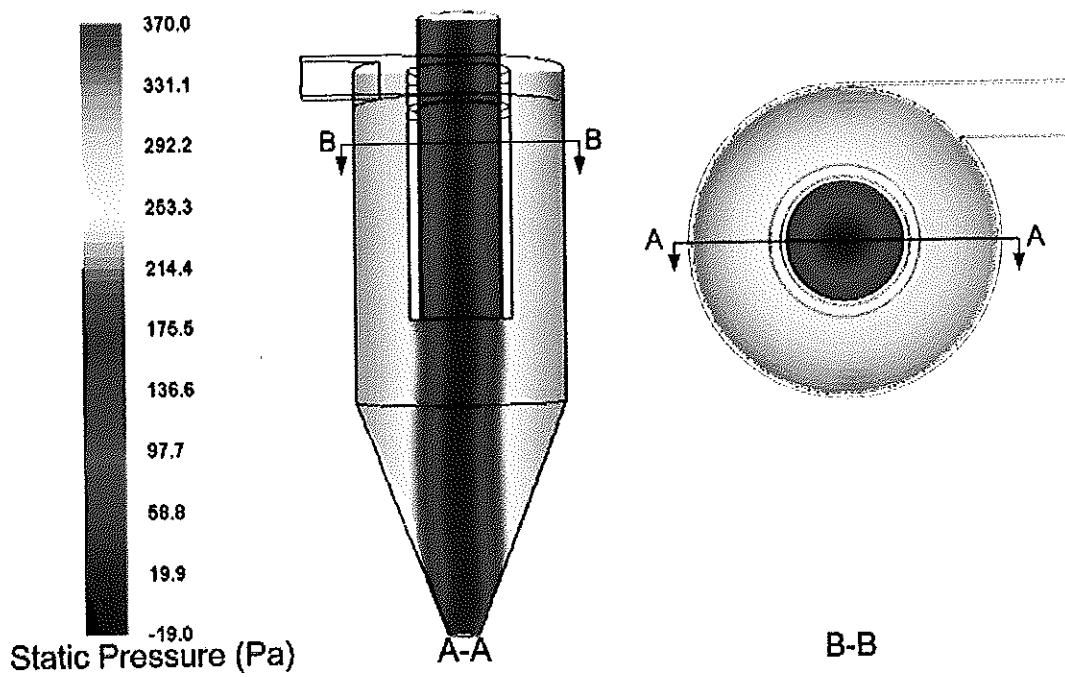
รูปที่ ก.1 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 3.32 m/s



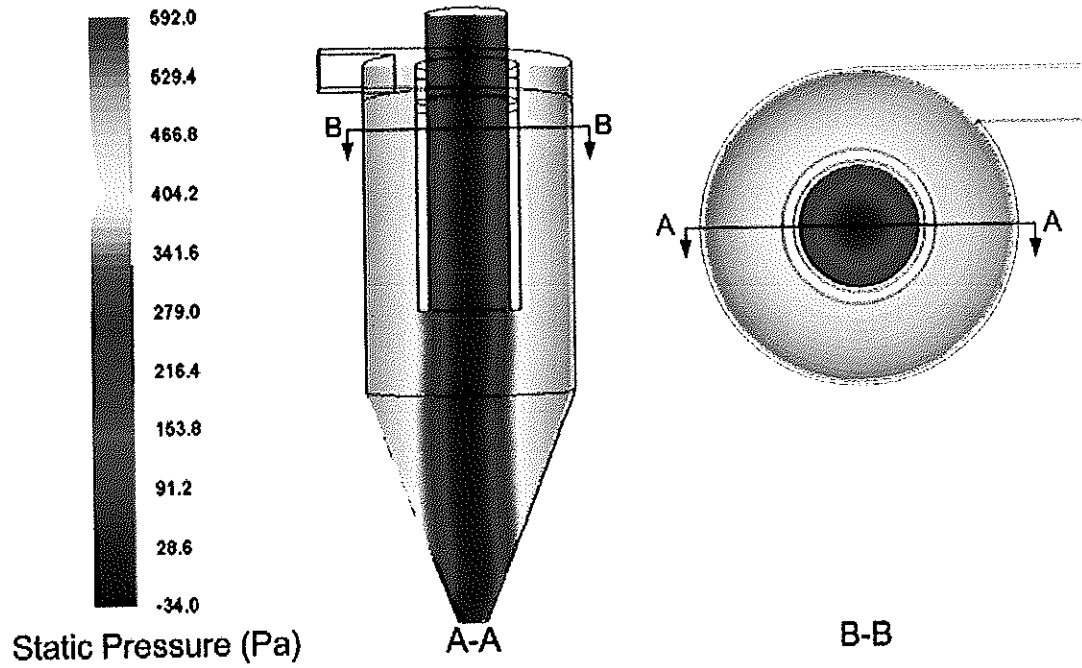
รูปที่ ก.2 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 6.63 m/s



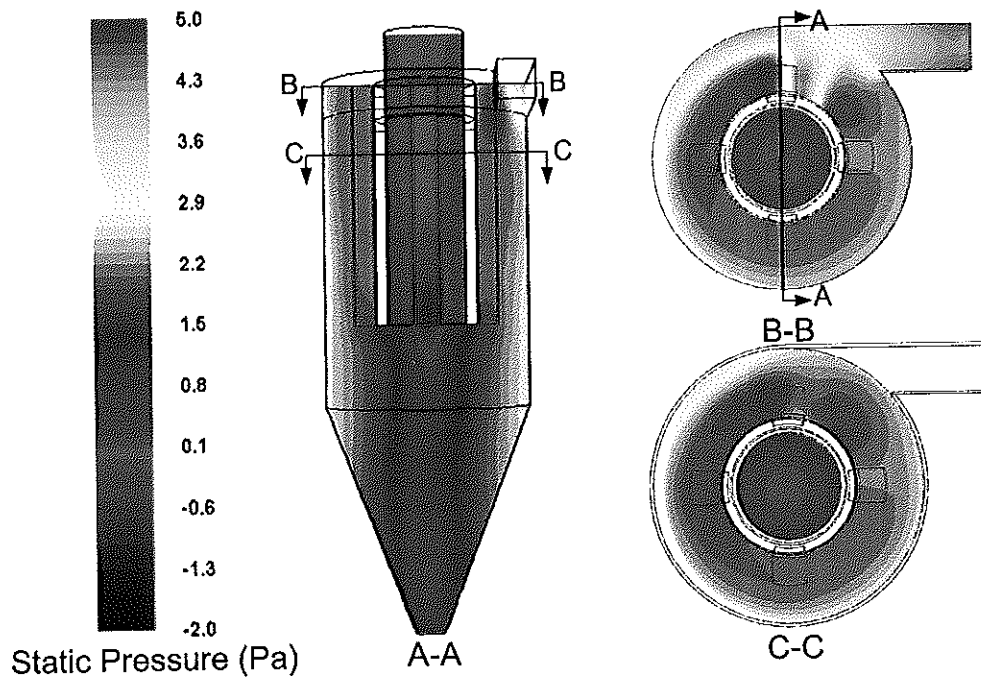
รูปที่ ก.3 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 9.95 m/s



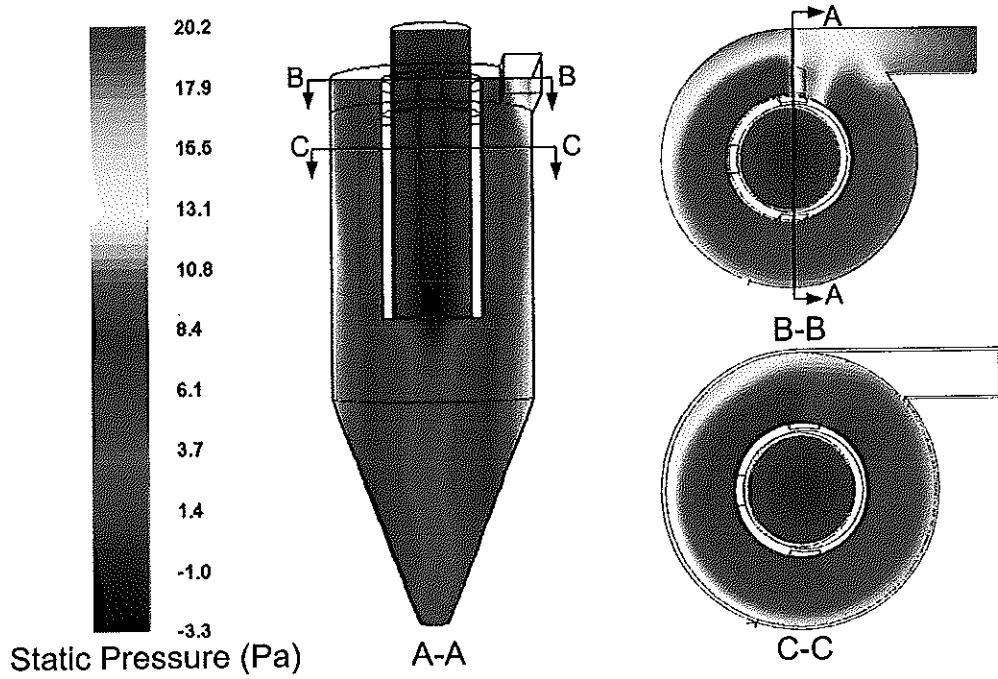
รูปที่ ก.4 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s



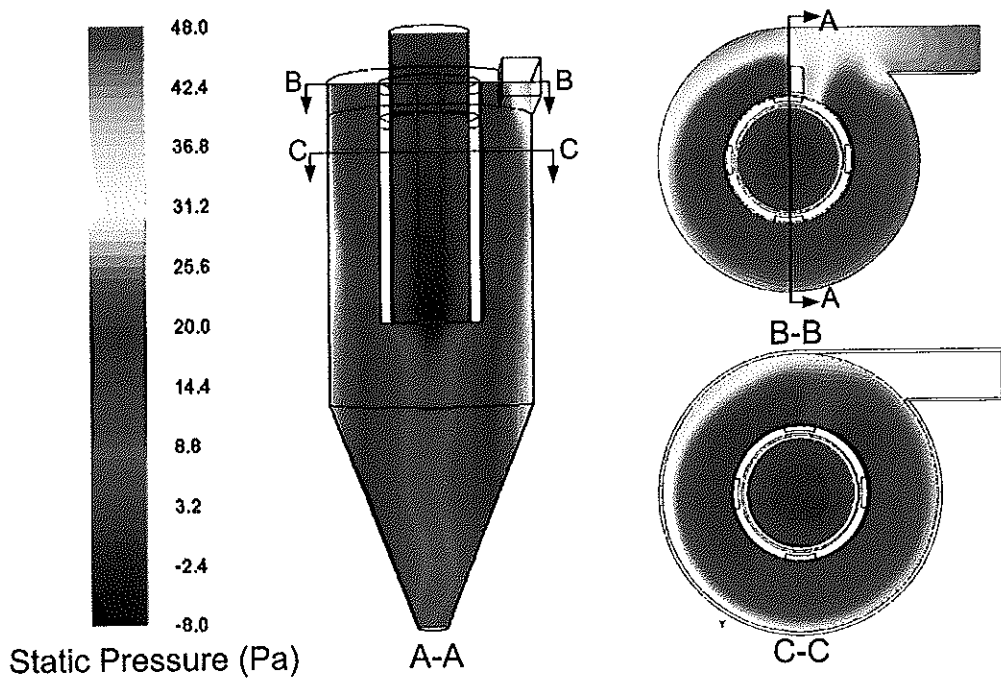
รูปที่ ก.5 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลนที่ความเร็วทางเข้า 16.59 m/s



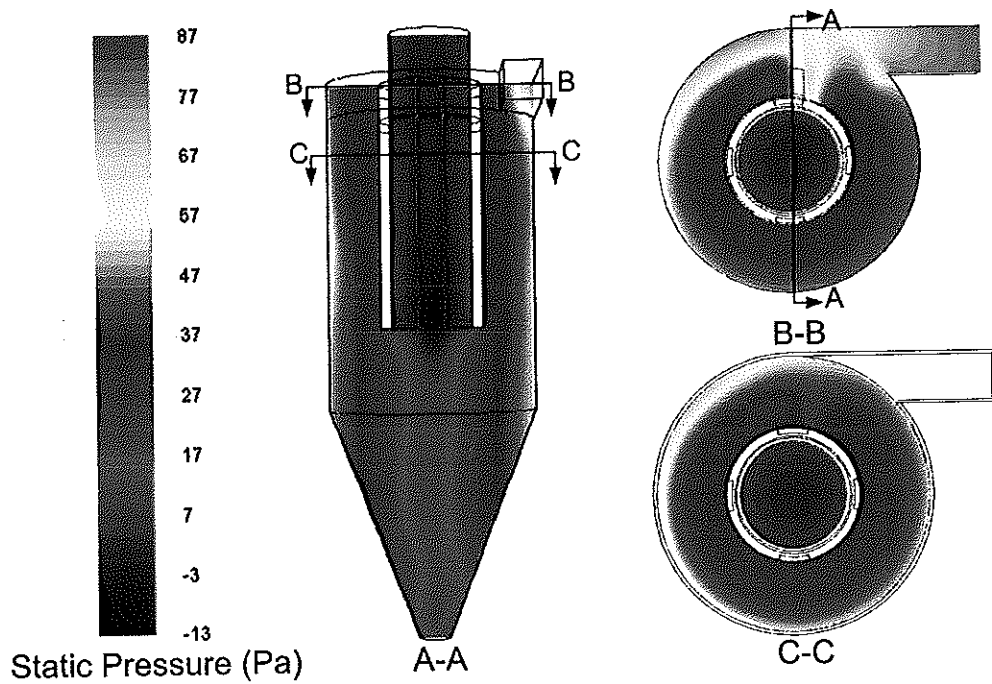
รูปที่ ก.6 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ความเร็วทางเข้า 3.32 m/s



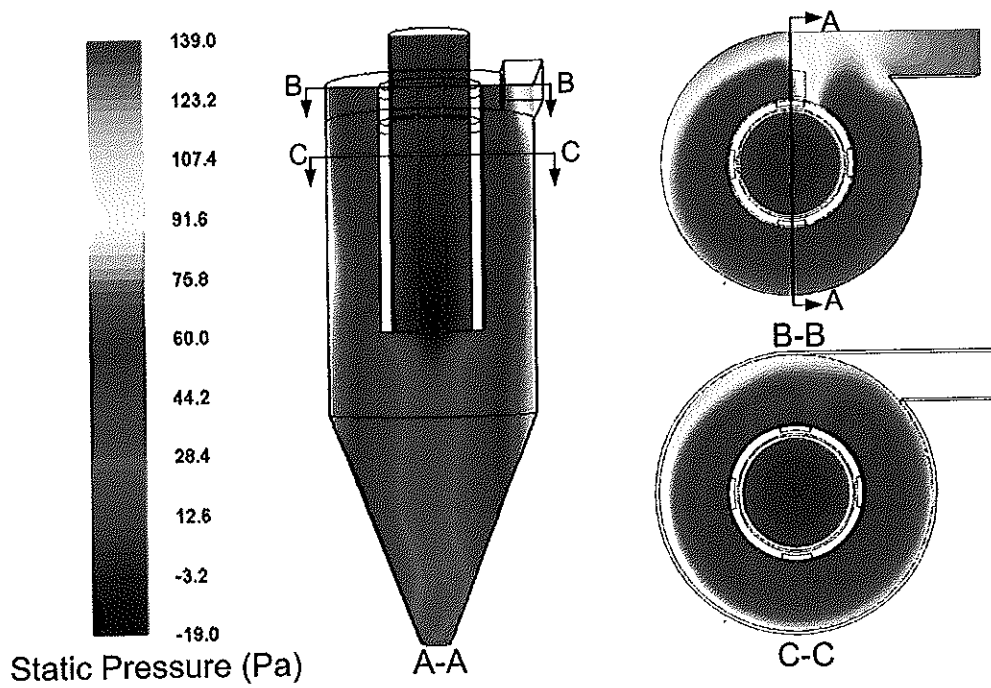
รูปที่ ก.7 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ความเร็วทางเข้า 6.63 m/s



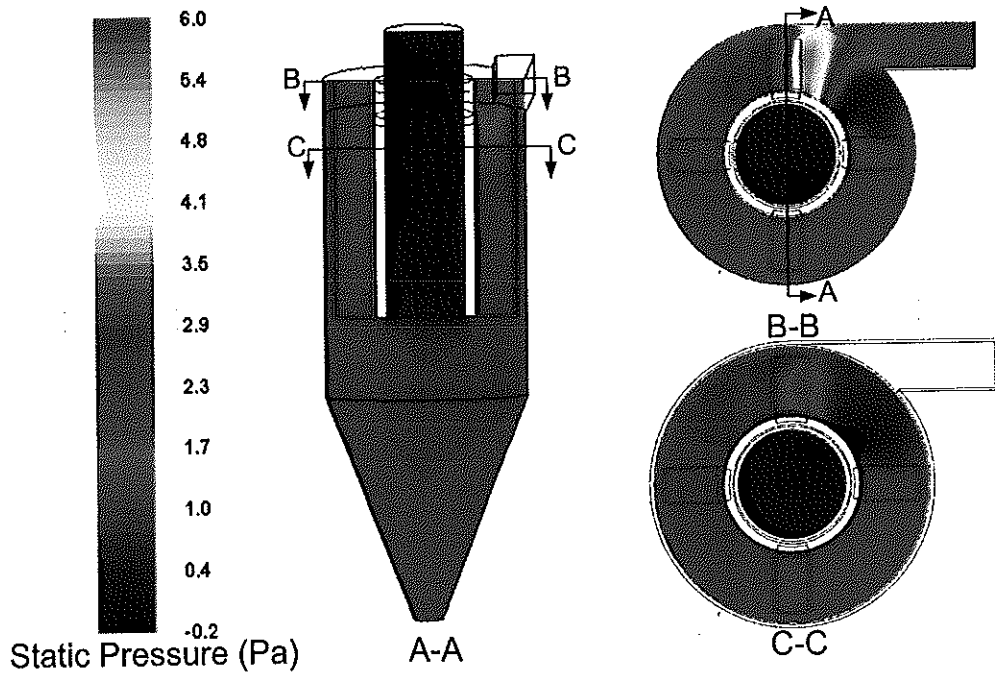
รูปที่ ก.8 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ที่ความเร็วทางเข้า 9.95 m/s



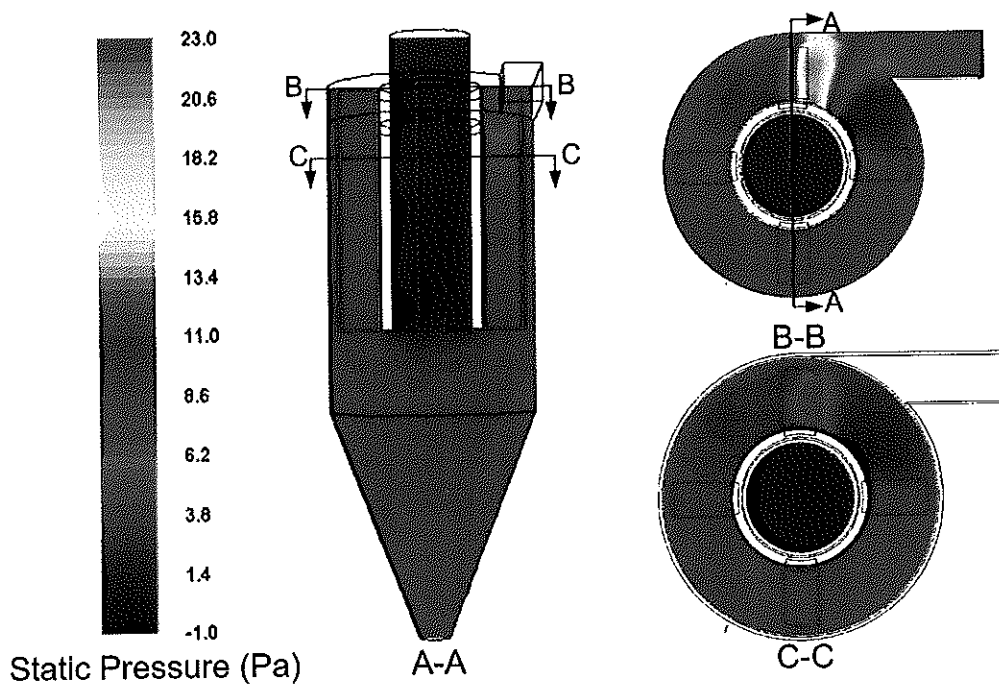
รูปที่ ก.9 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm
ที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s



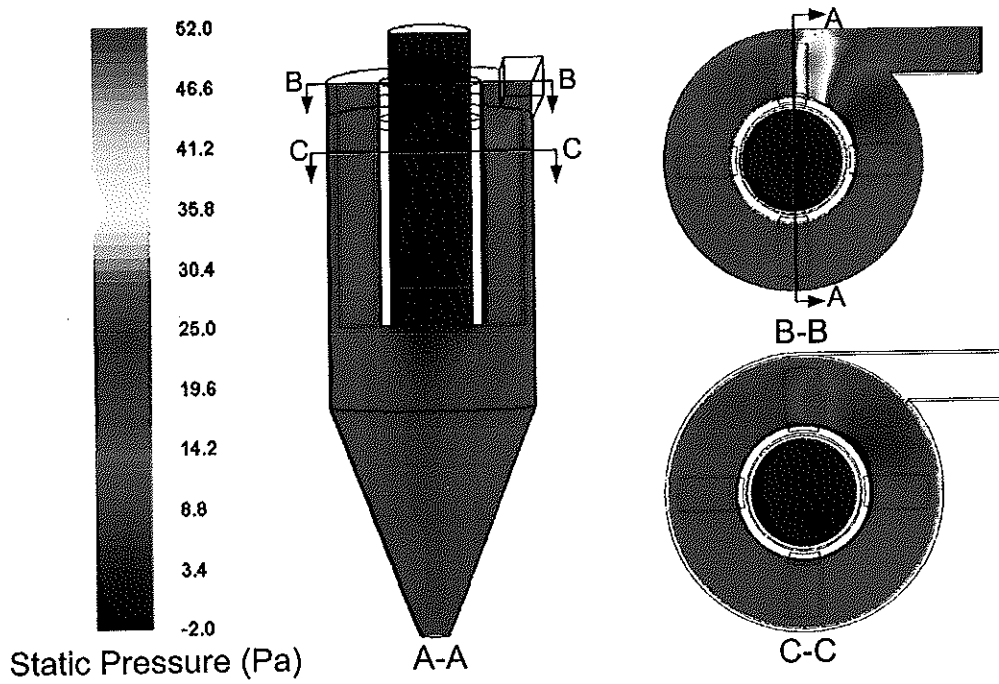
รูปที่ ก.10 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm
ที่ความเร็วทางเข้า 16.59 m/s



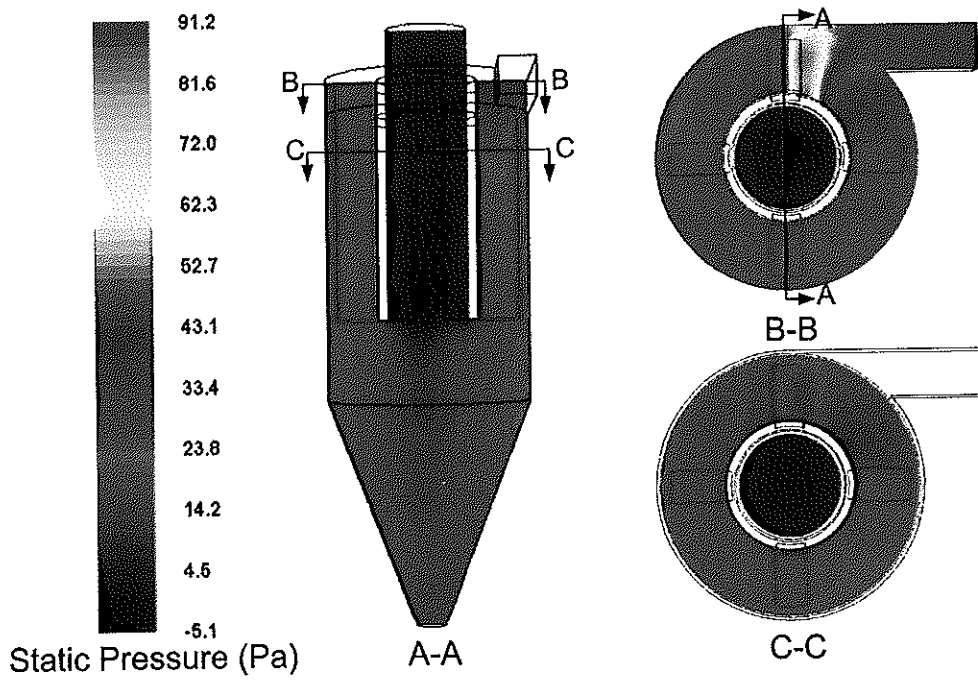
รูปที่ ก.11 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm
ที่ความเร็วทางเข้า 3.32 m/s



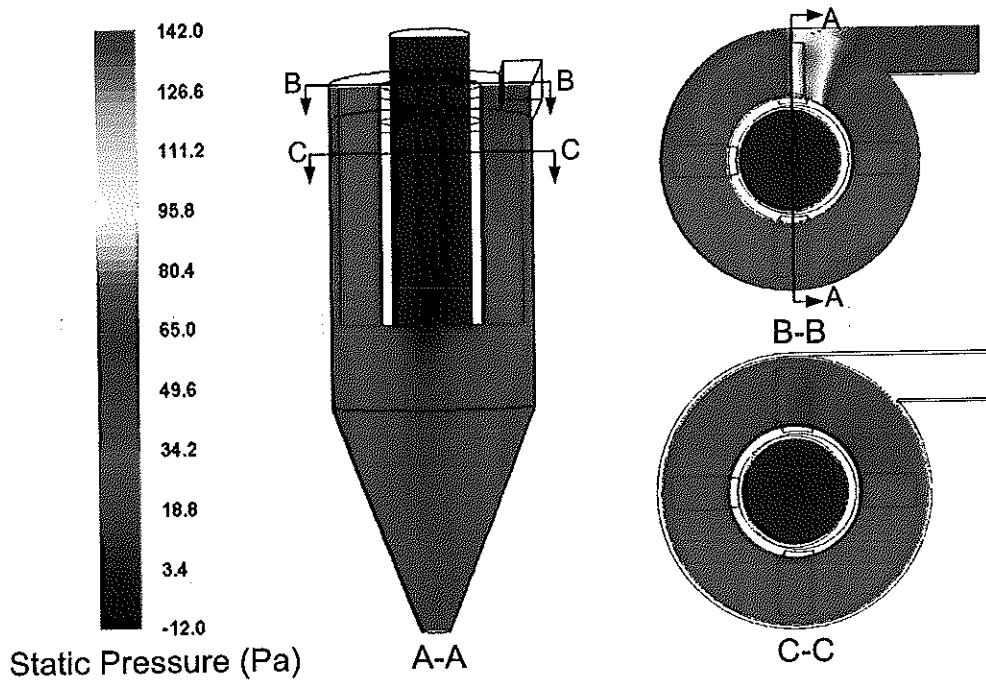
รูปที่ ก.12 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm
ที่ความเร็วทางเข้า 6.63 m/s



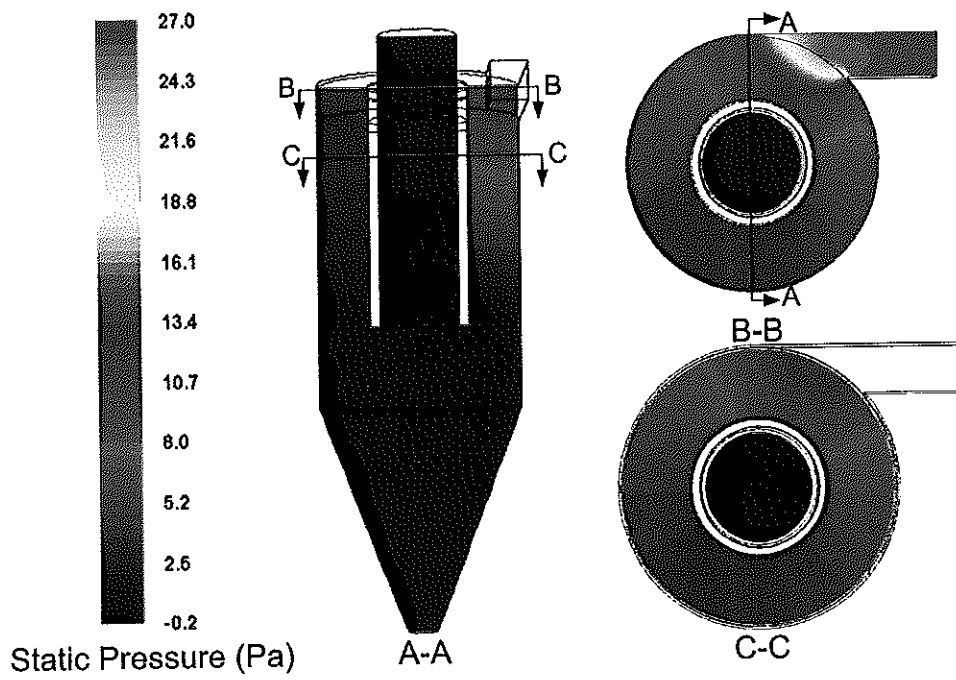
รูปที่ ก.13 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm
ที่ความเร็วทางเข้า 9.95 m/s



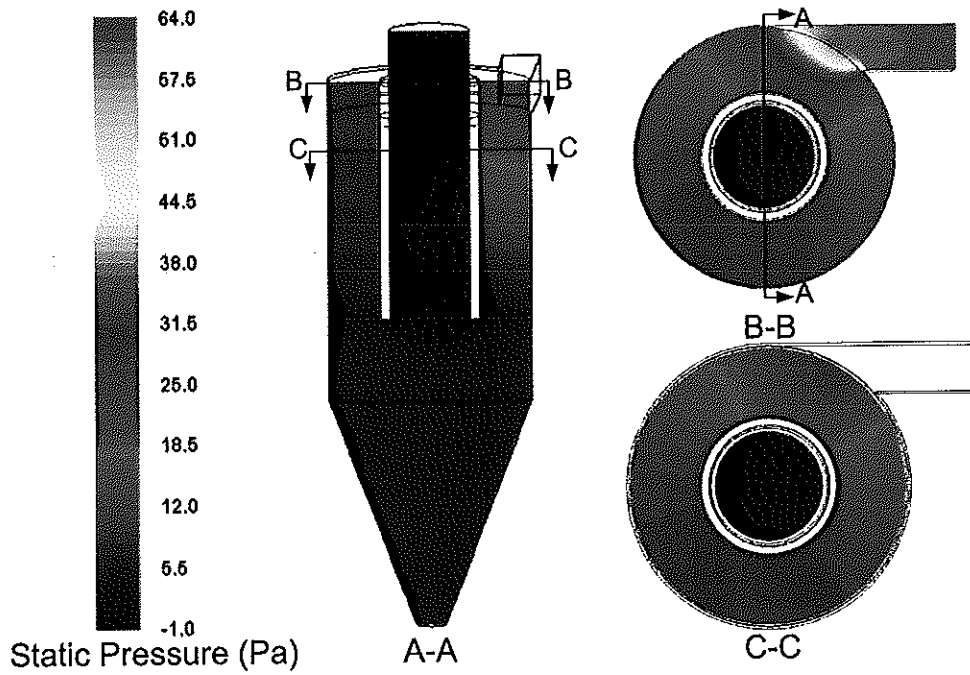
รูปที่ ก.14 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm
ที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s



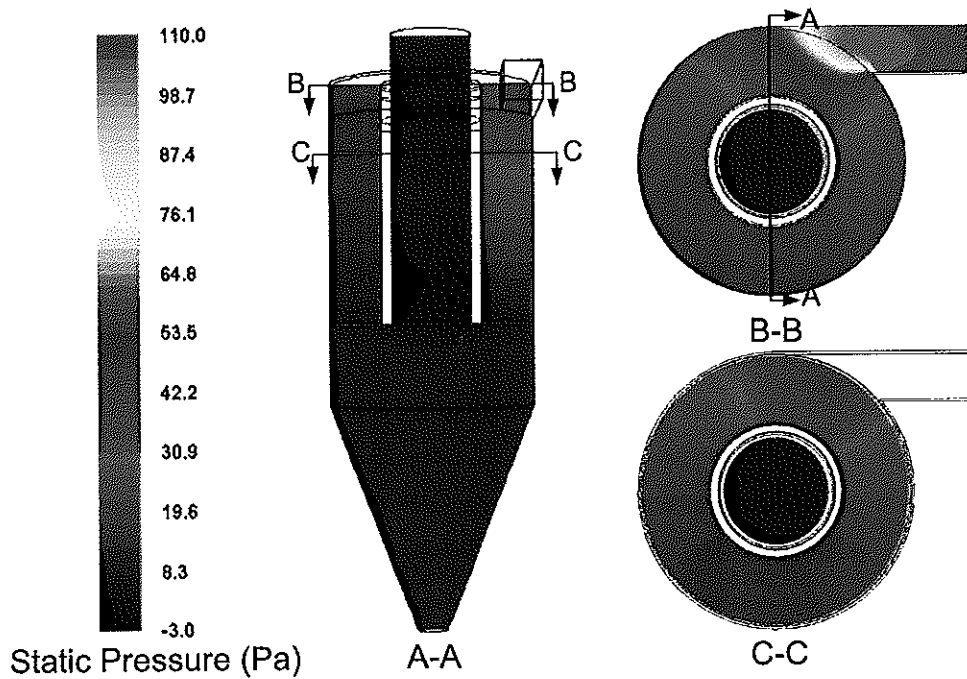
รูปที่ ก.15 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm
ที่ความเร็วทางเข้า 16.59 m/s



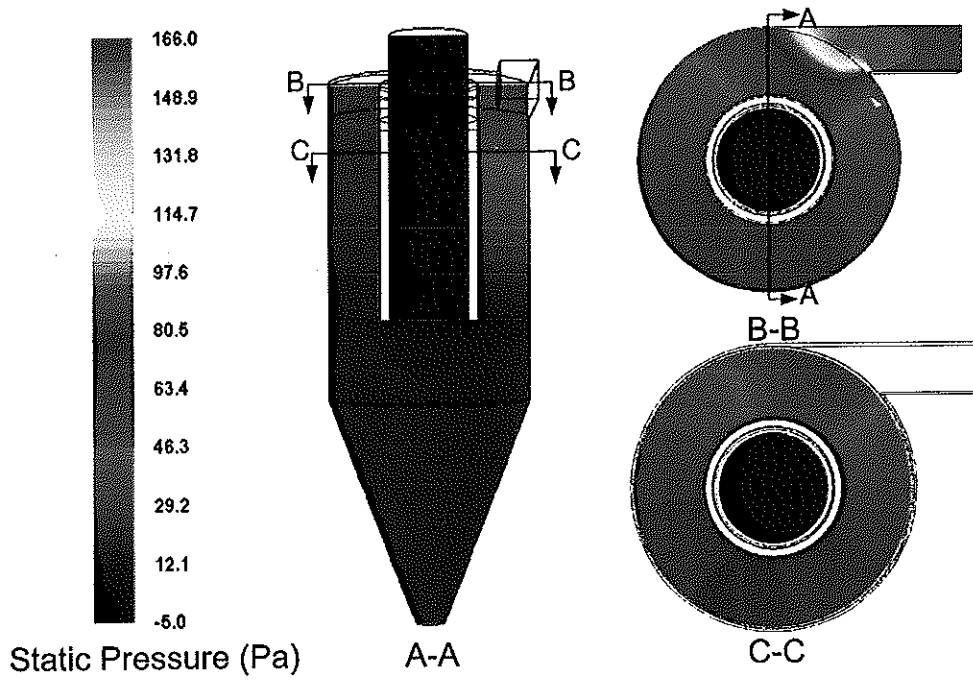
รูปที่ ก.16 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g
ที่ความเร็วทางเข้า 3.32 m/s



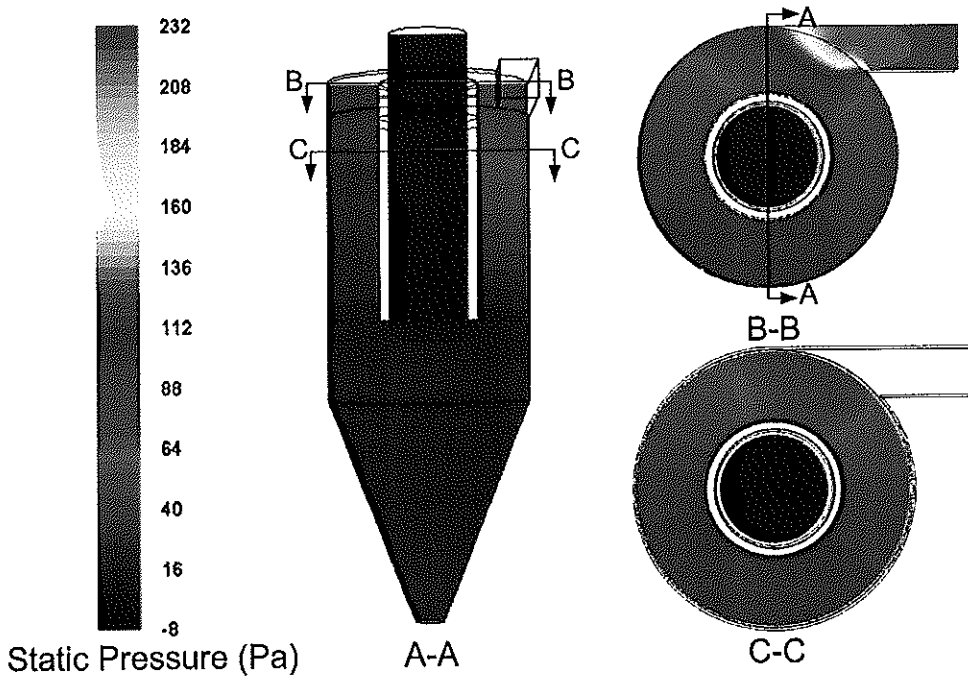
รูปที่ ก.17 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ที่ความเร็วทางเข้า 6.63 m/s



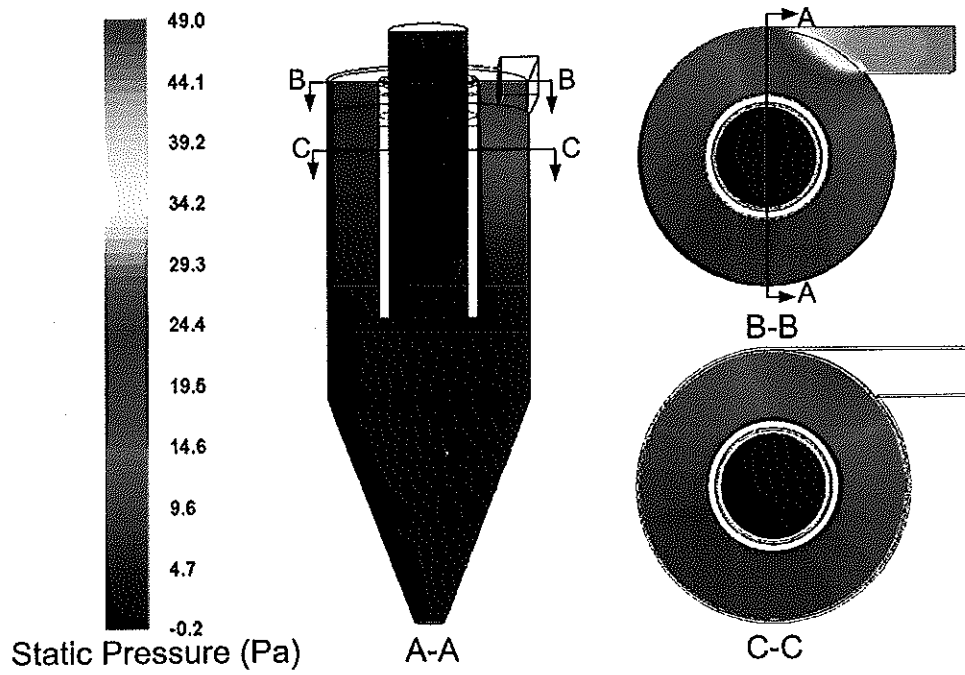
รูปที่ ก.18 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ที่ความเร็วทางเข้า 9.95 m/s



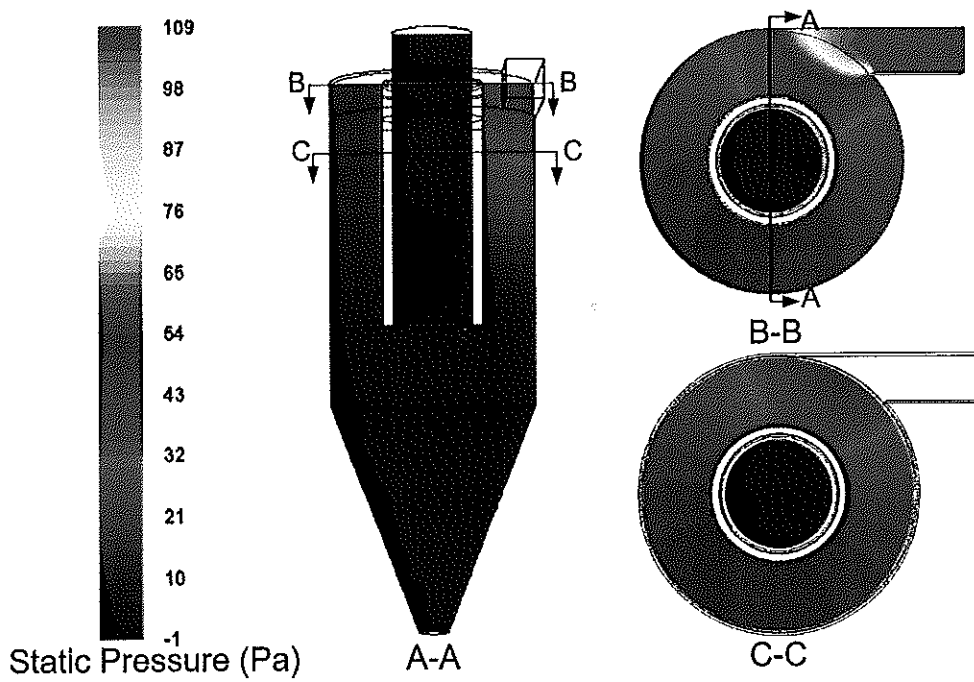
รูปที่ ก.19 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s



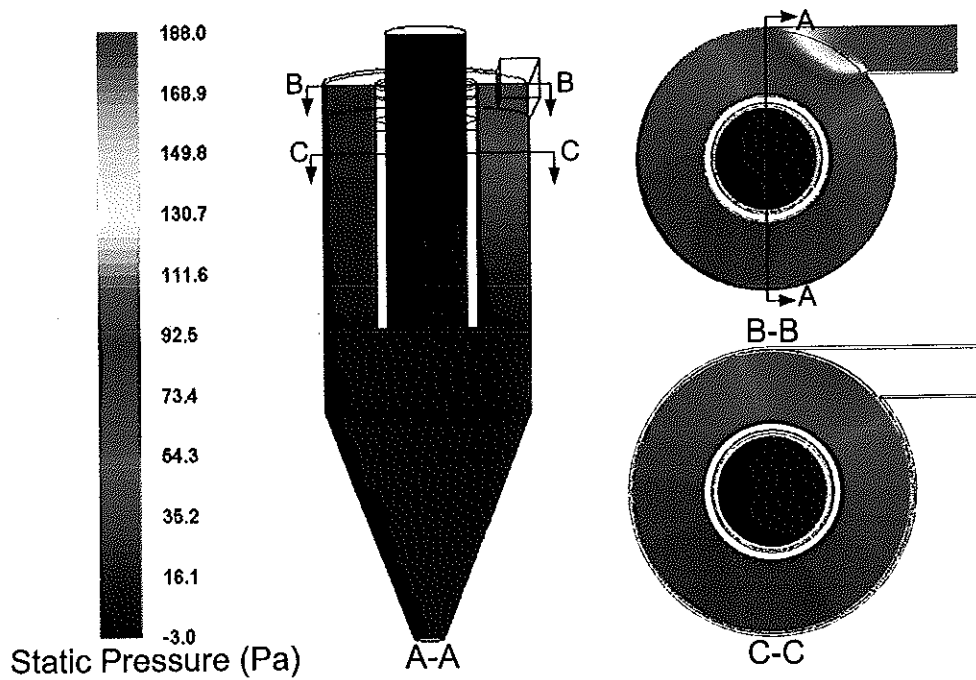
รูปที่ ก.20 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ที่ความเร็วทางเข้า 16.59 m/s



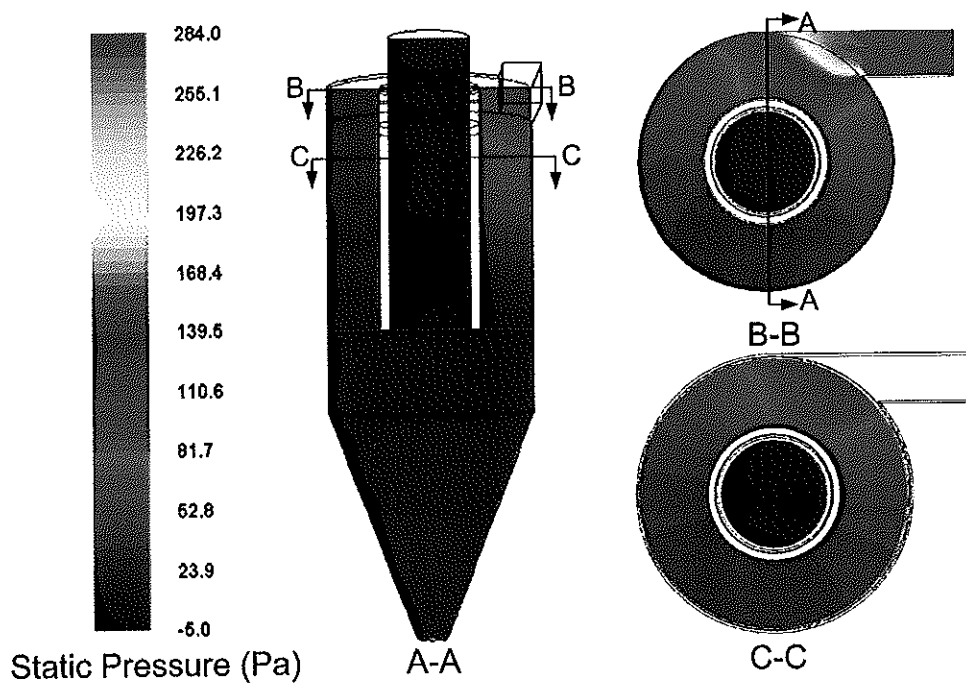
รูปที่ ก.21 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g
ที่ความเร็วทางเข้า 3.32 m/s



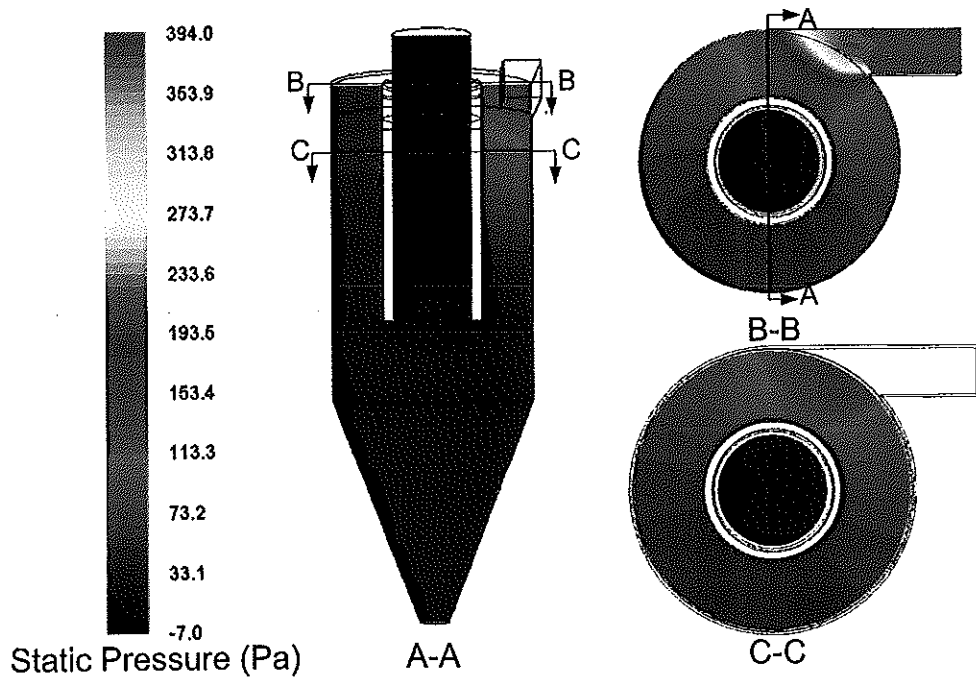
รูปที่ ก.22 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g
ที่ความเร็วทางเข้า 6.63 m/s



รูปที่ ก.23 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ที่ความเร็วทางเข้า 9.95 m/s



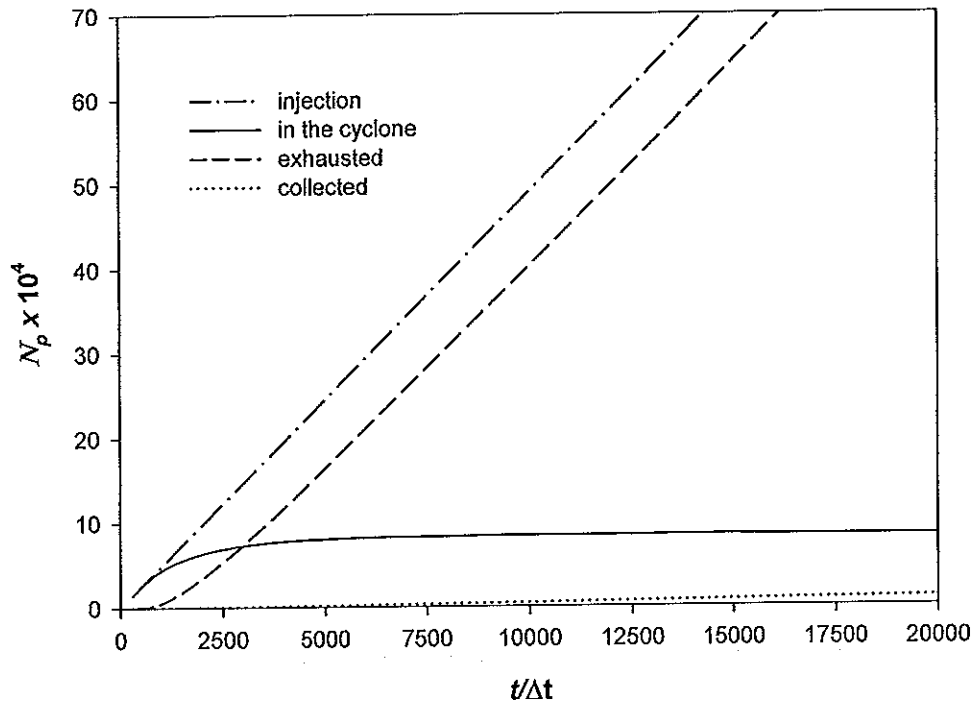
รูปที่ ก.24 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ที่ความเร็วทางเข้า 13.27 m/s



รูปที่ ก.25 รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g
ที่ความเร็วทางเข้า 16.59 m/s

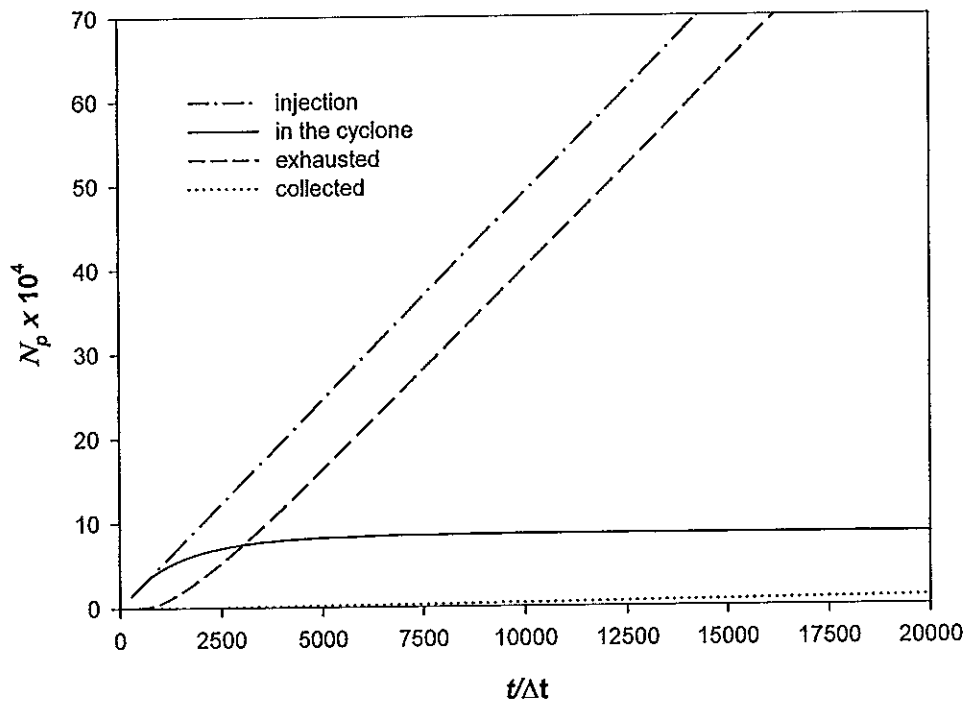
ภาคผนวก ข

กราฟแสดงจำนวนของอนุภาคในไซโคลนในแต่ละเวลา



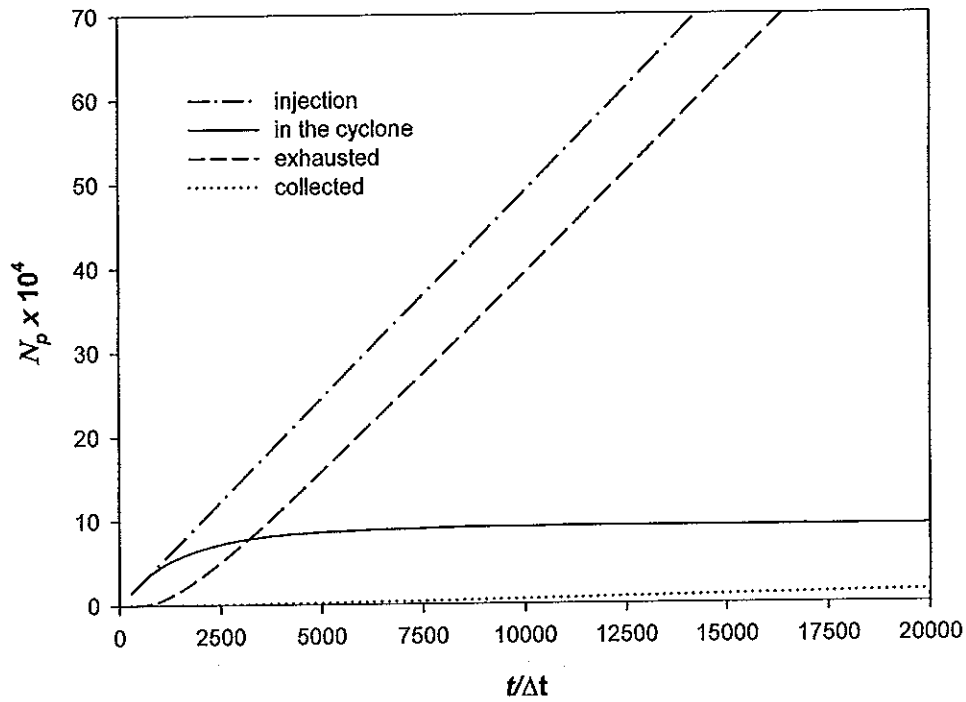
รูปที่ ข.1 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s

$$d_p = 0.3 \text{ micron}$$



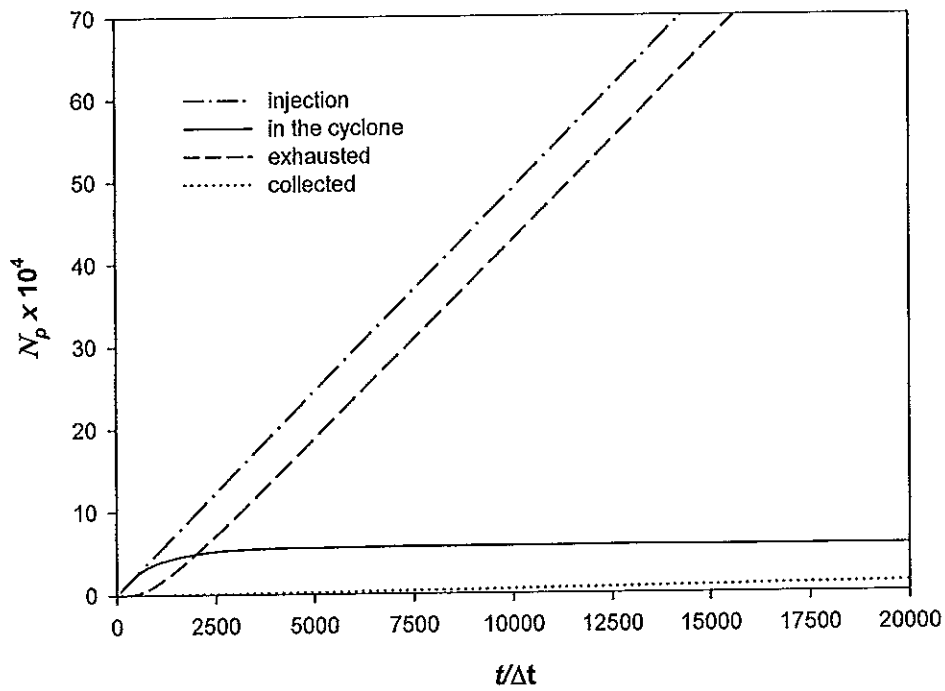
รูปที่ ข.2 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s

$$d_p = 0.5 \text{ micron}$$



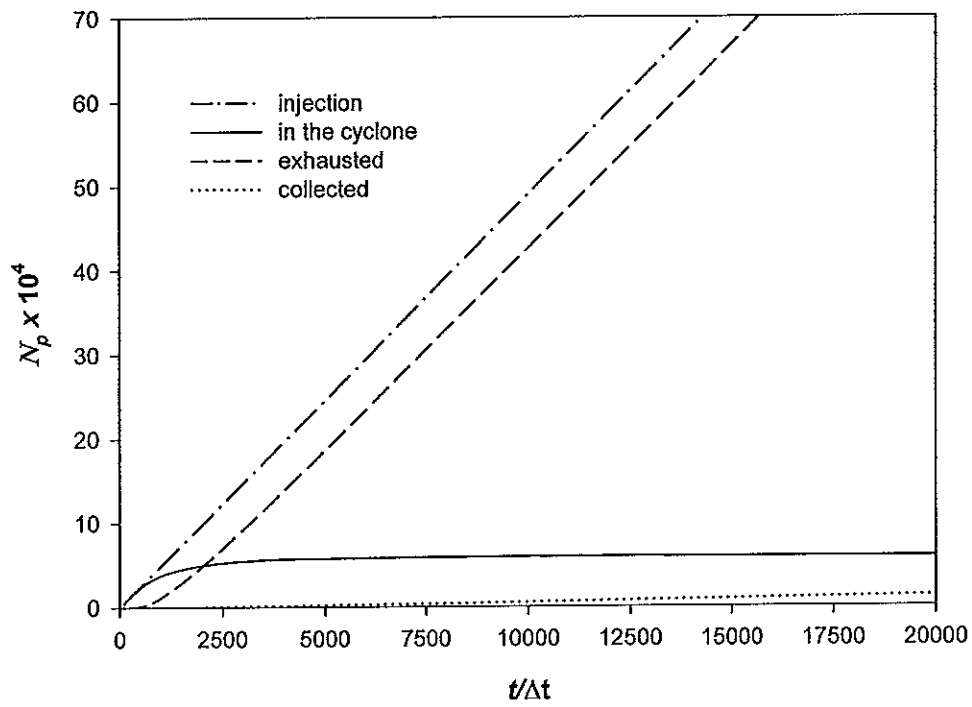
รูปที่ ข.3 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s

$$d_p = 1 \text{ micron}$$



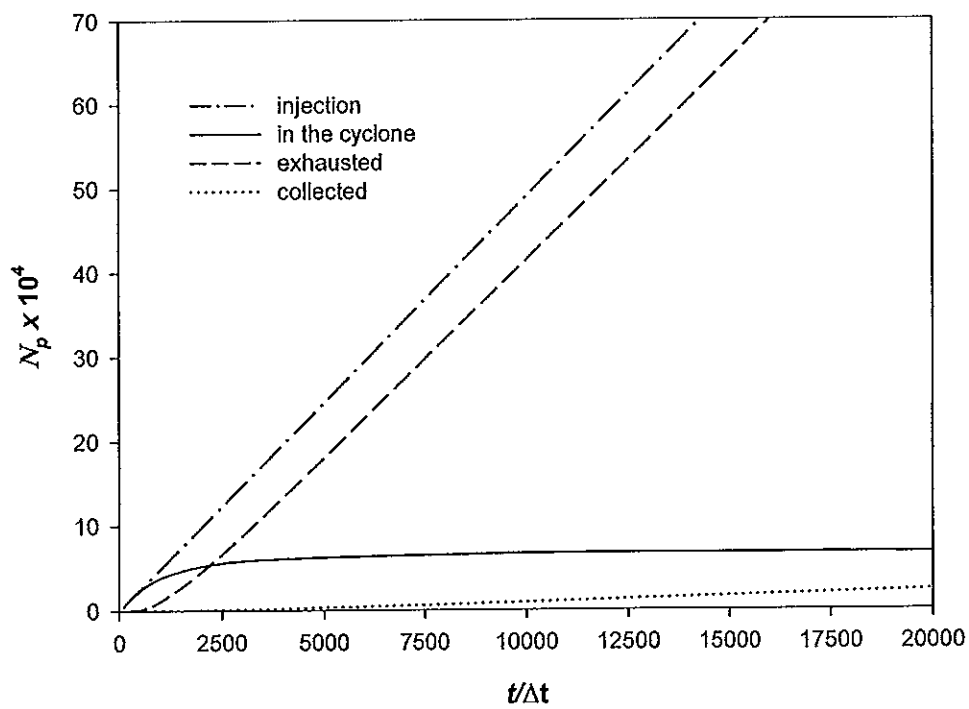
รูปที่ ข.4 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 19.90 m/s

$$d_p = 0.3 \text{ micron}$$



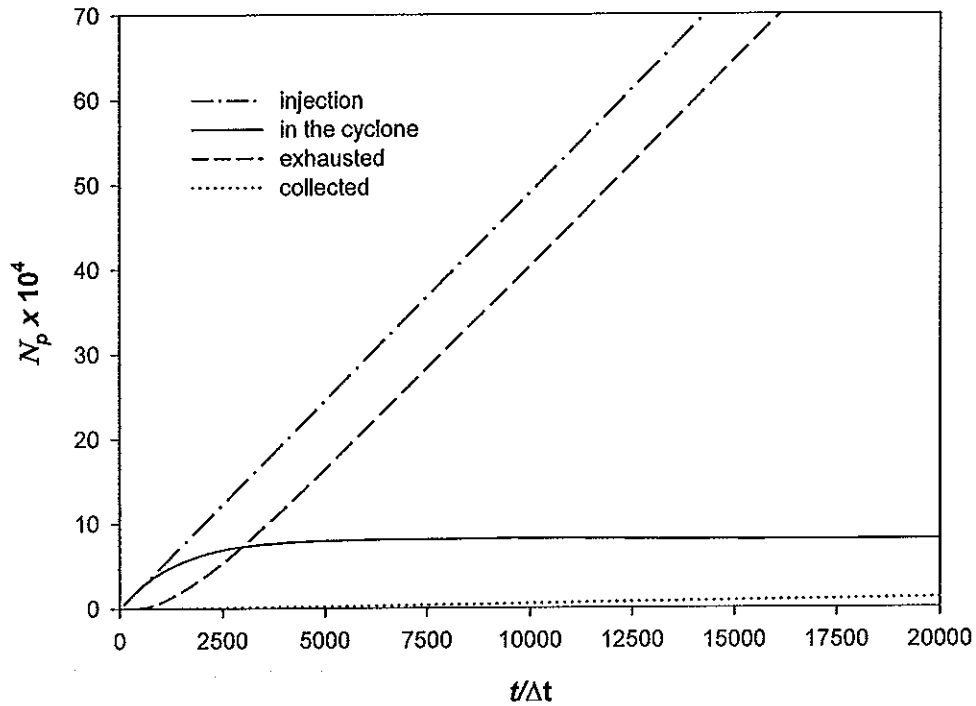
รูปที่ ข.5 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 19.90 m/s

$$d_p = 0.5 \text{ micron}$$



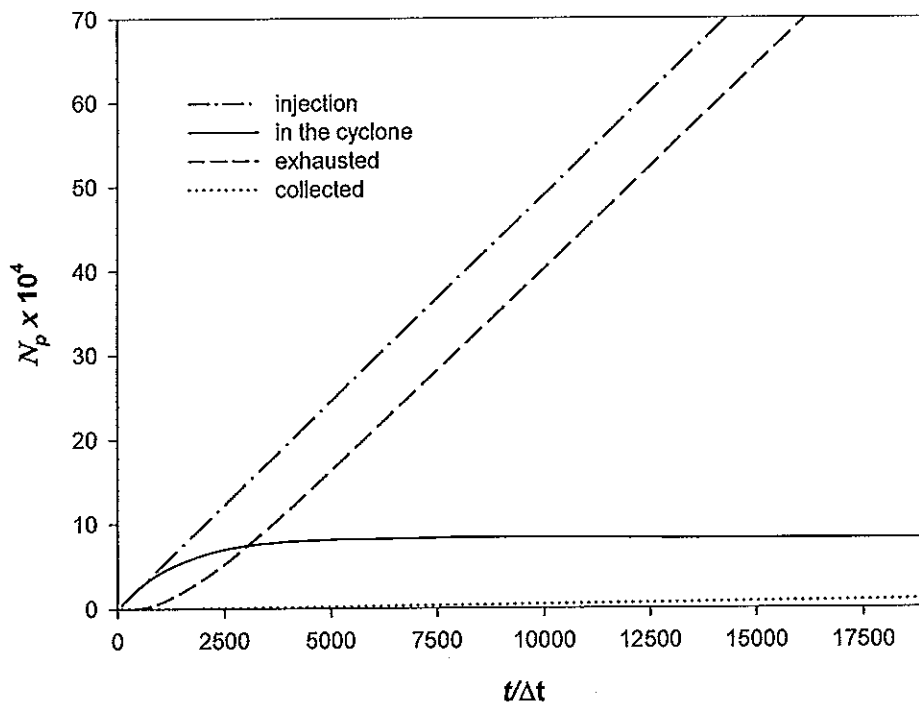
รูปที่ ข.6 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 4 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 19.90 m/s

$$d_p = 1 \text{ micron}$$



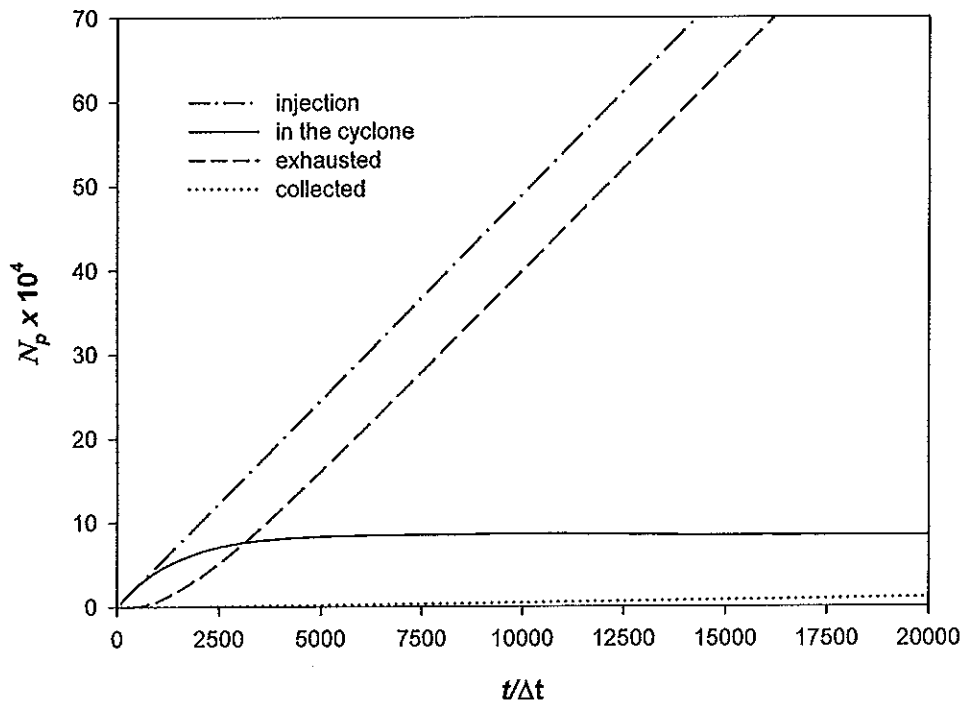
รูปที่ ข.7 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s

$$d_p = 0.3 \text{ micron}$$



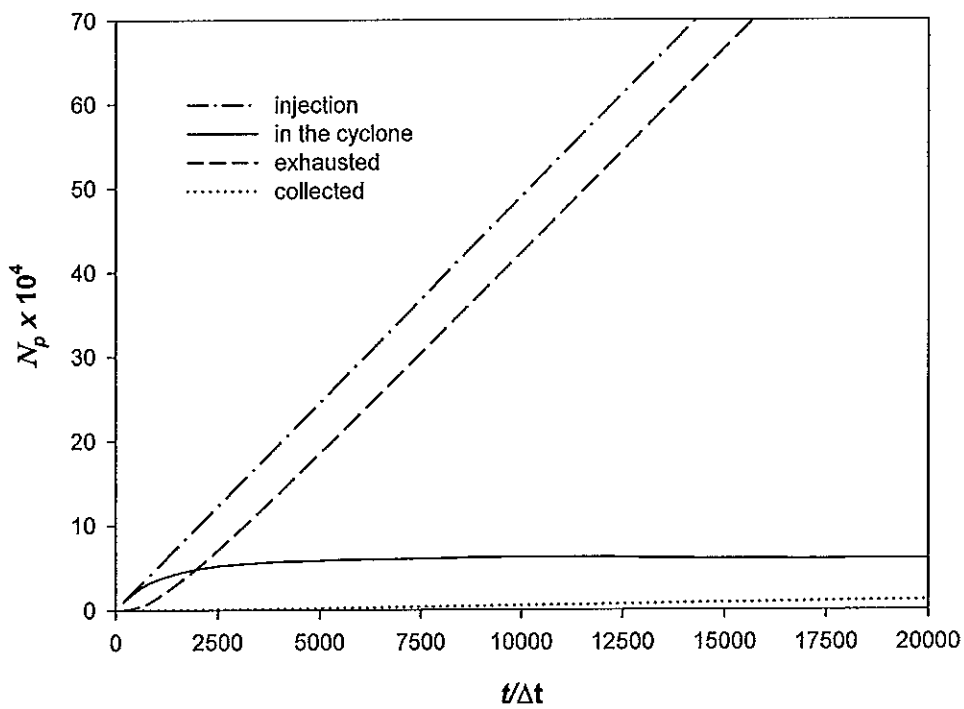
รูปที่ ข.8 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s

$$d_p = 0.5 \text{ micron}$$



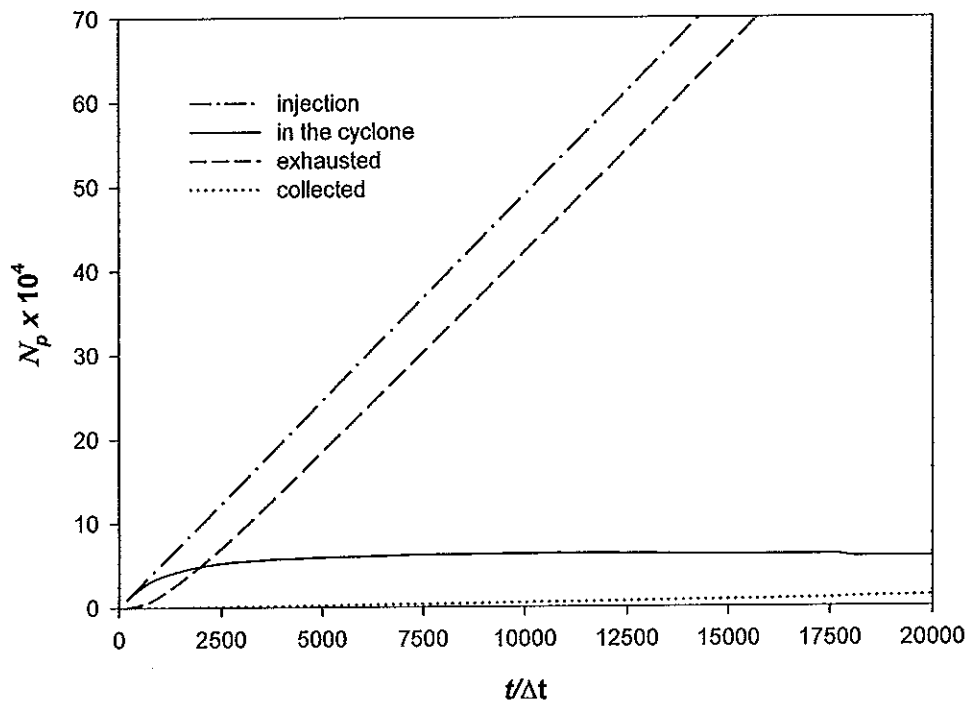
รูปที่ ข.9 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s

$$d_p = 1 \text{ micron}$$



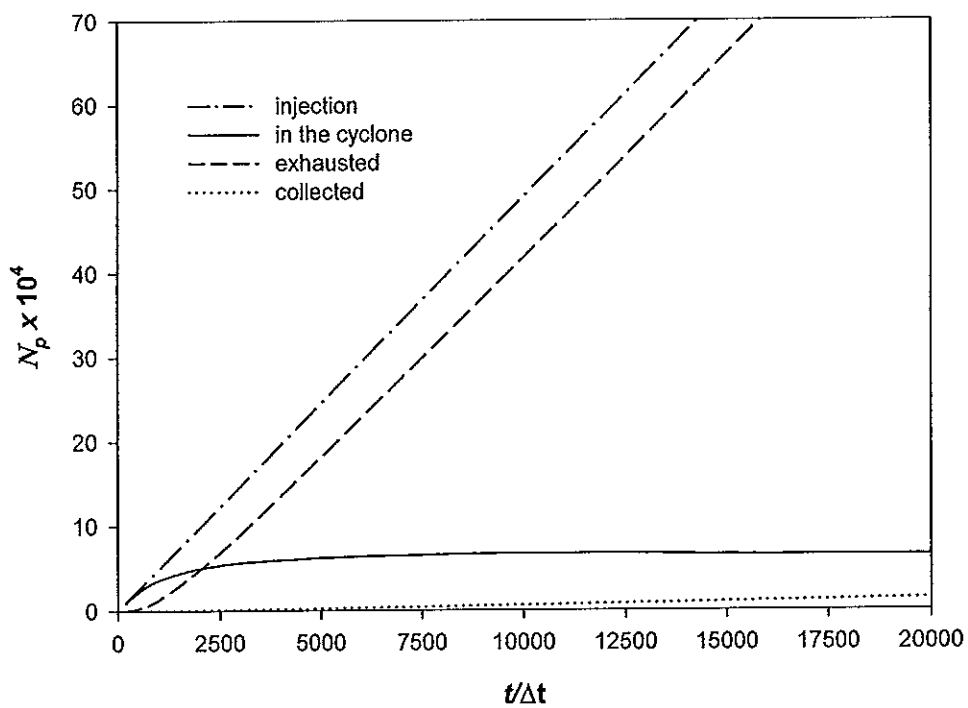
รูปที่ ข.10 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 19.90 m/s

$$d_p = 0.3 \text{ micron}$$



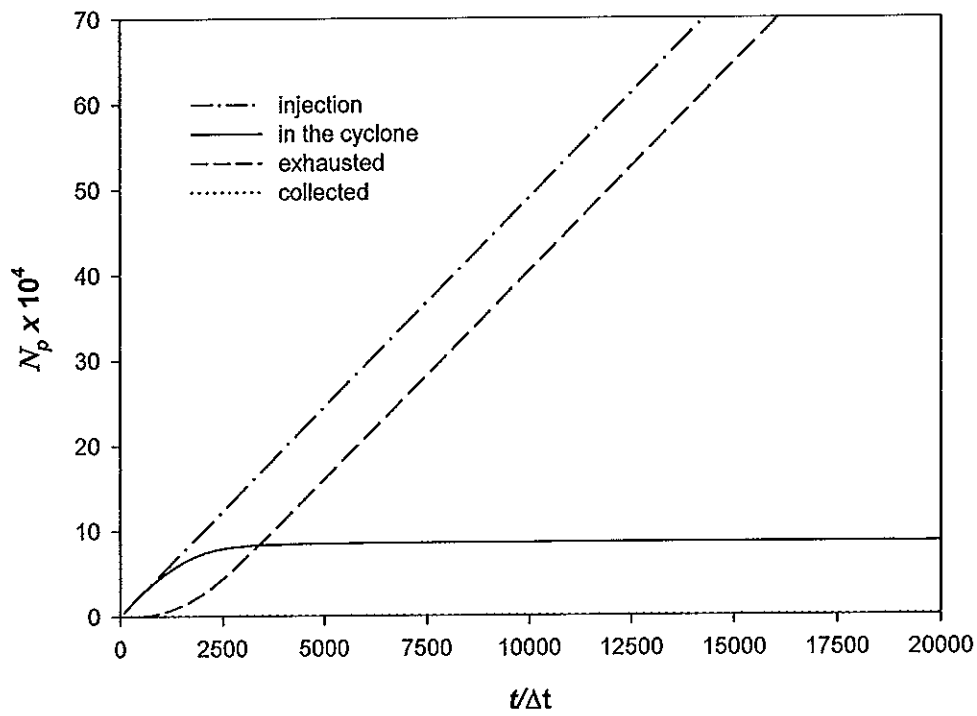
รูปที่ ข.11 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 19.90 m/s

$$d_p = 0.5 \text{ micron}$$

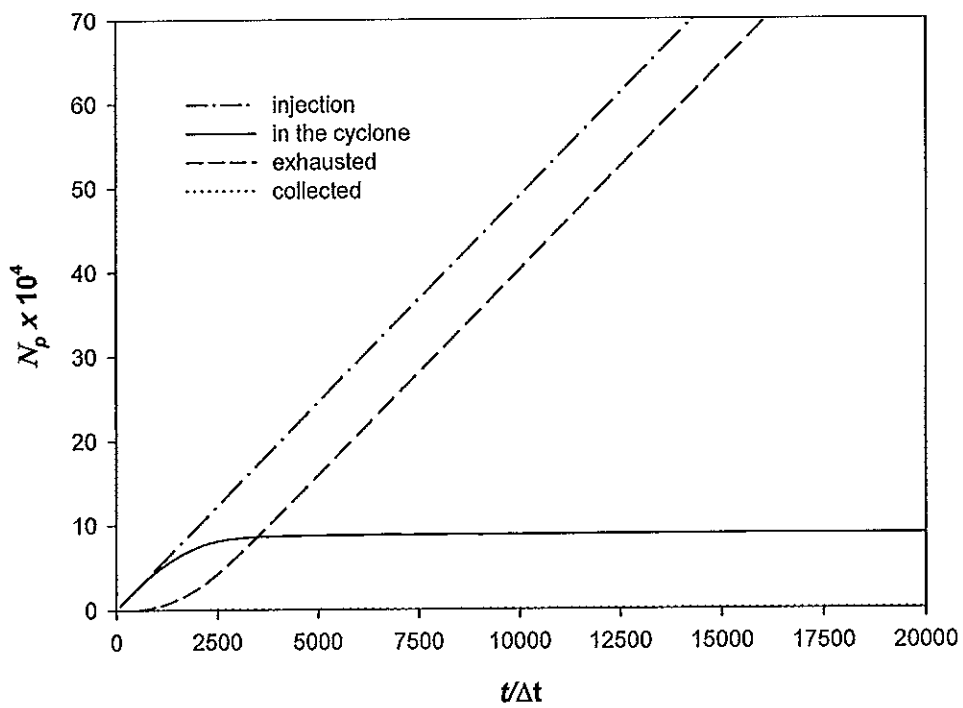


รูปที่ ข.12 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยไฟเบอร์ 8 mm ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 19.90 m/s

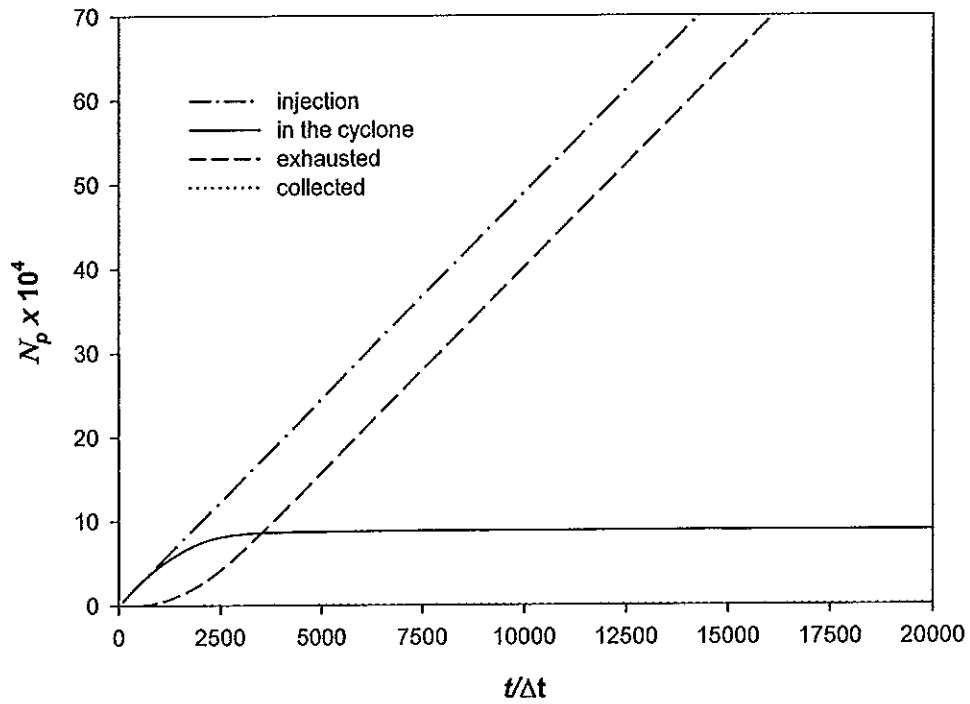
$$d_p = 1 \text{ micron}$$



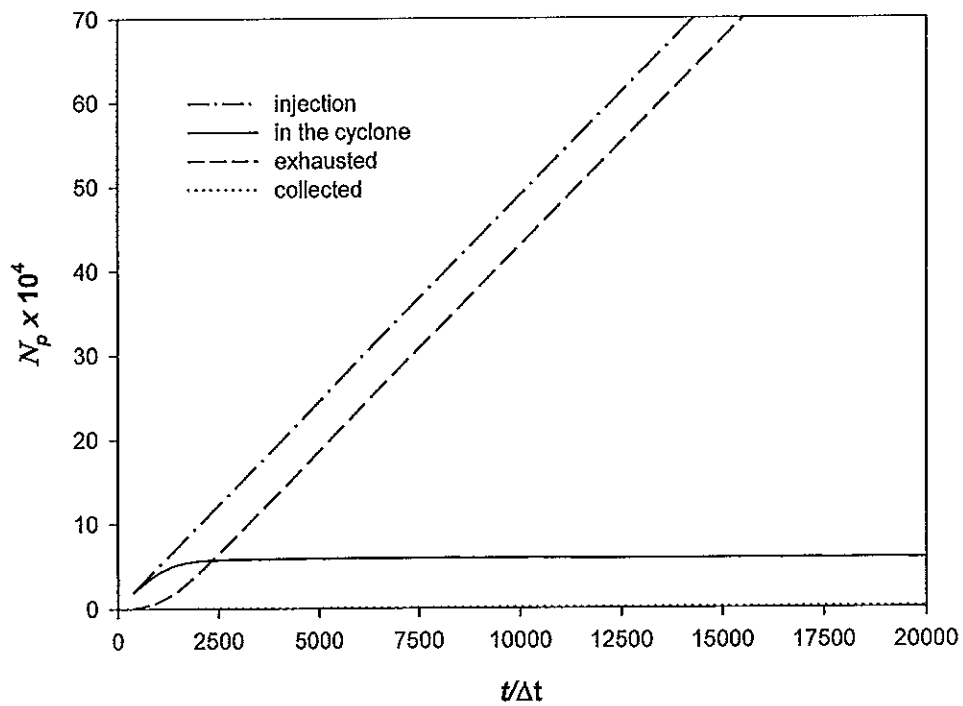
รูปที่ ข.13 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s $d_p = 0.3$ micron



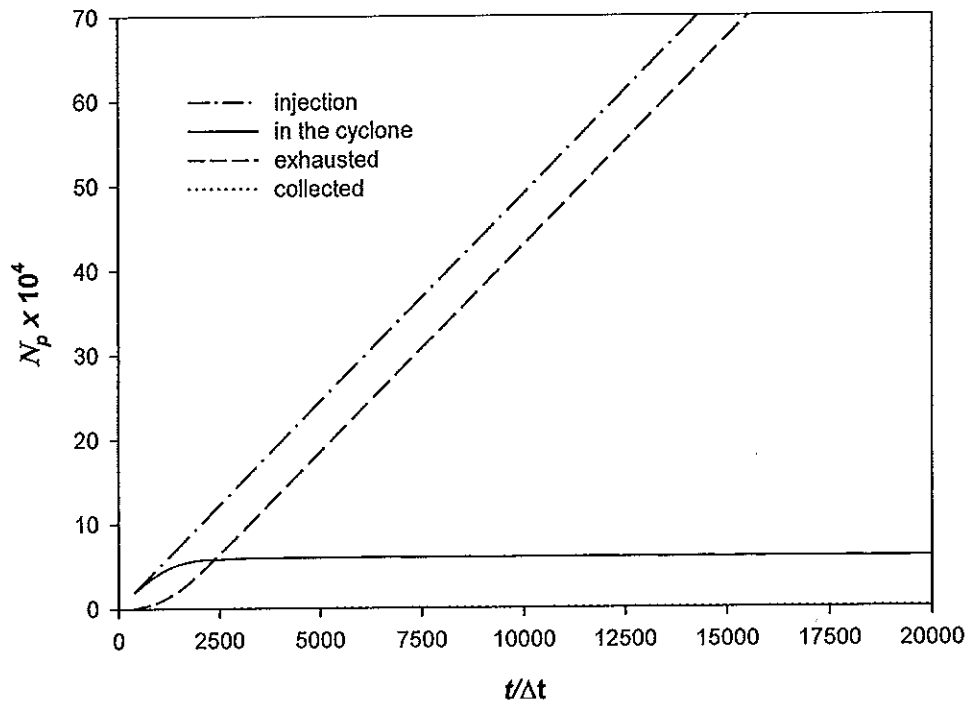
รูปที่ ข.14 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ในแต่ละเวลาที่ความเร็ว 13.27 m/s $d_p = 0.5$ micron



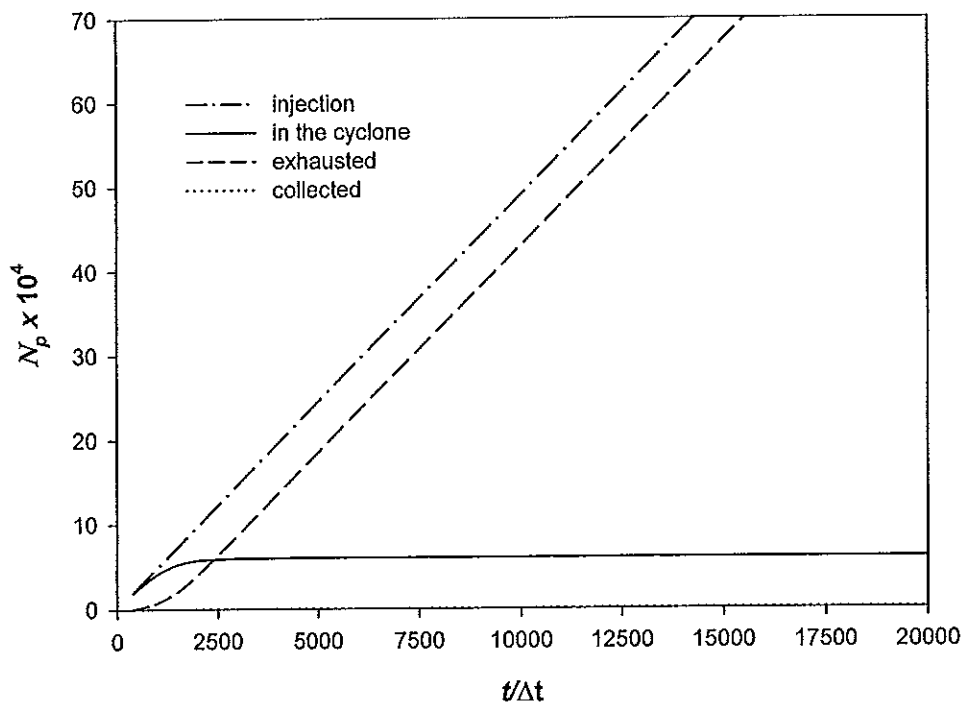
รูปที่ ข.15 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 13.27 m/s $d_p = 1$ micron



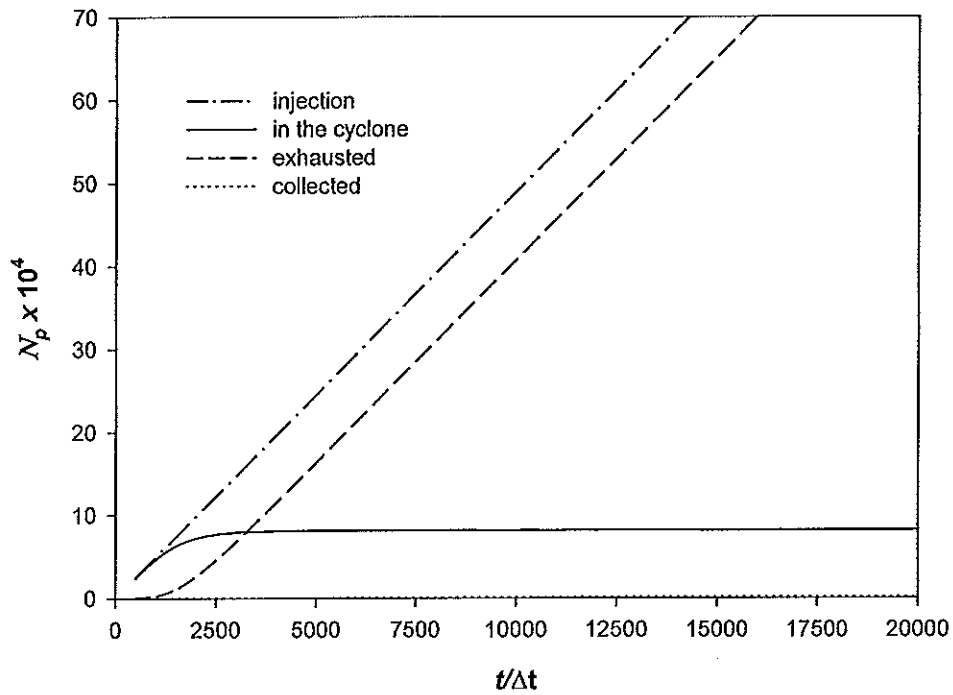
รูปที่ ข.16 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 0.94 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 19.90 m/s $d_p = 0.3$ micron



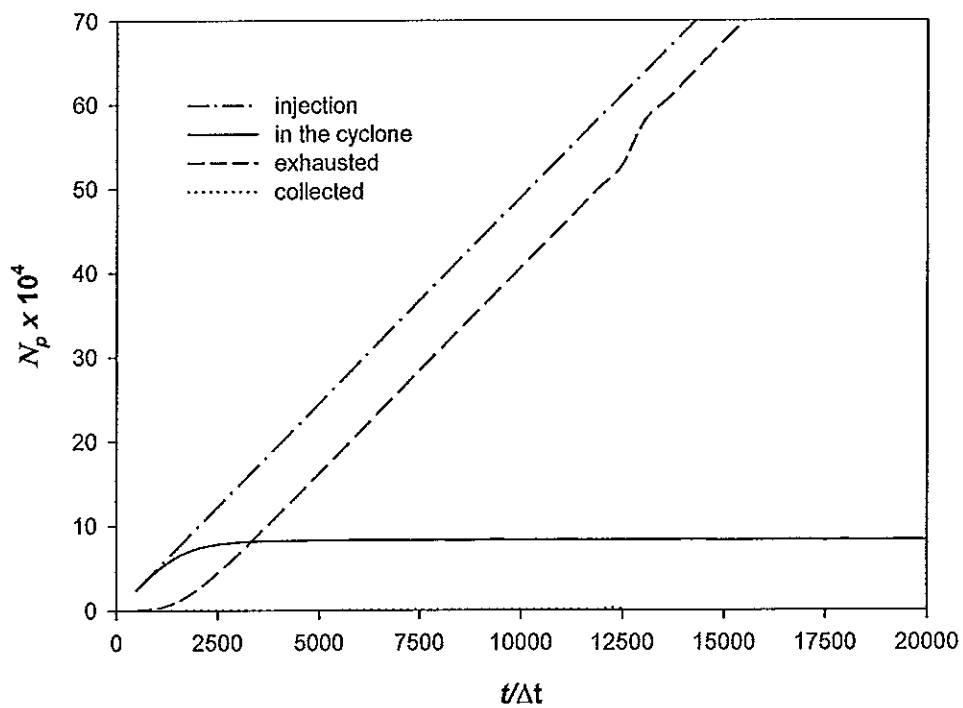
รูปที่ ข.17 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นไฮสแตนเลส 0.94 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 19.90 m/s $d_p = 0.5$ micron



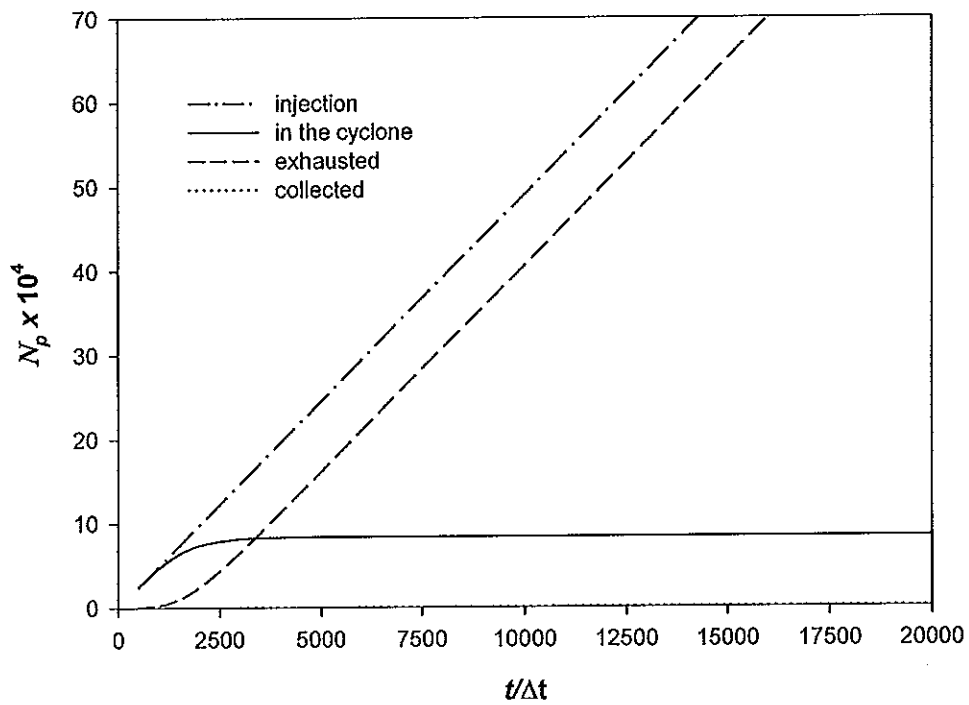
รูปที่ ข.18 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นไฮสแตนเลส 0.94 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 19.90 m/s $d_p = 1$ micron



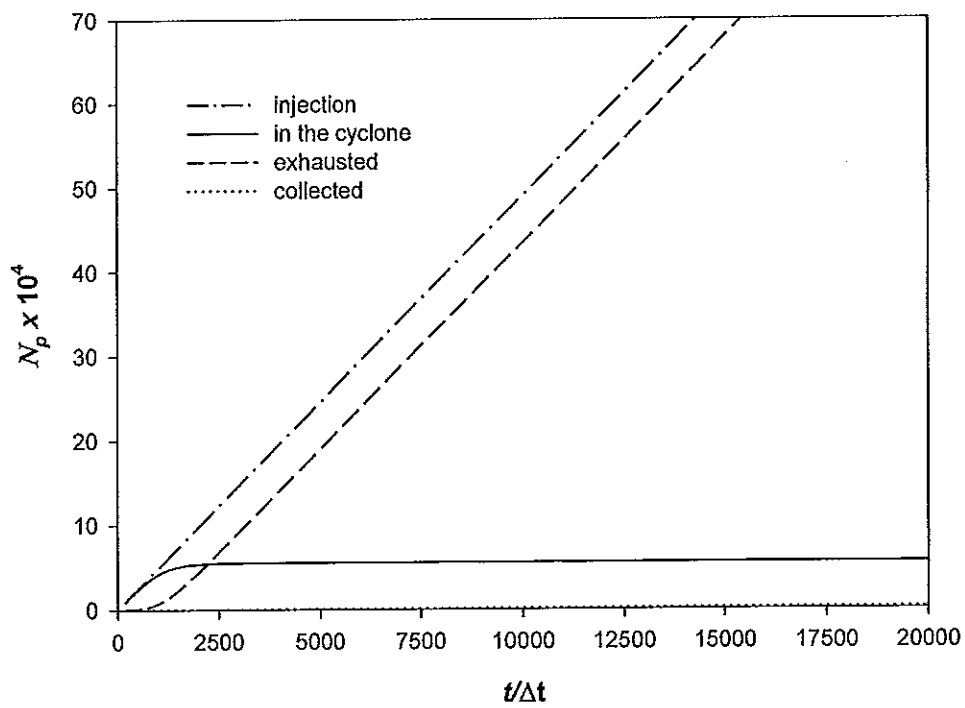
รูปที่ ข.19 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 13.27 m/s $d_p = 0.3$ micron



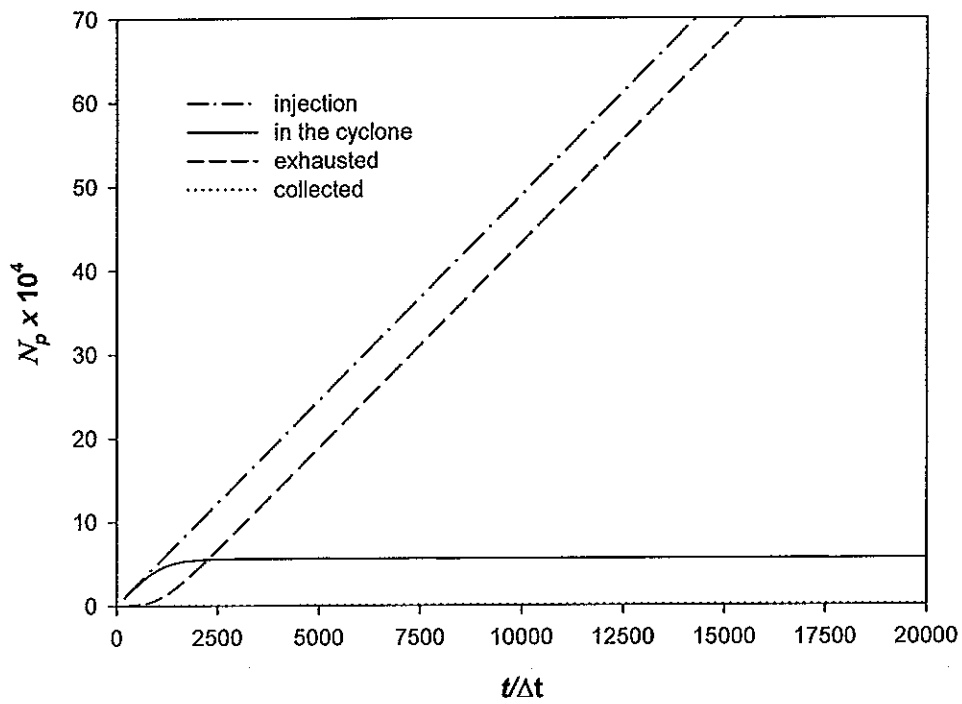
รูปที่ ข.20 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 13.27 m/s $d_p = 0.5$ micron



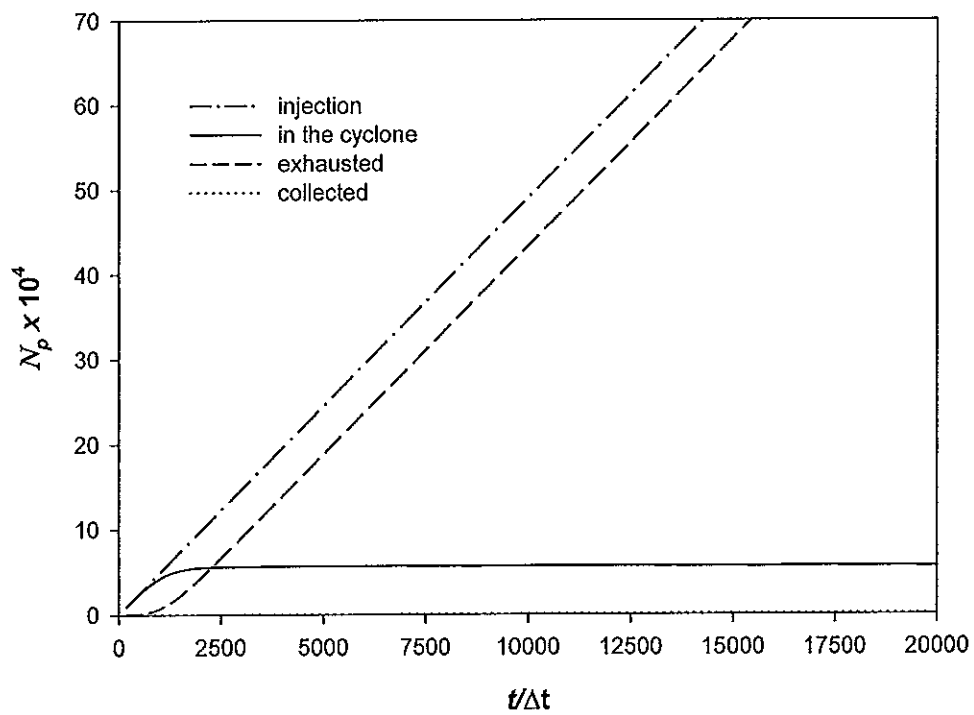
รูปที่ ข.21 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 13.27 m/s $d_p = 1$ micron



รูปที่ ข.22 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นใยสแตนเลส 1.83 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 19.90 m/s $d_p = 0.3$ micron

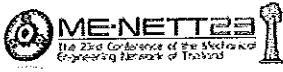


รูปที่ ข.23 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นไฮสแตนเลส 1.83 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 19.90 m/s $d_p = 0.5$ micron



รูปที่ ข.24 จำนวนของอนุภาคในไซโคลน-เส้นไฮสแตนเลส 1.83 g ในแต่ละเวลาที่
ความเร็ว 19.90 m/s $d_p = 1$ micron

ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



CST

การประชุมวิชาการเครื่องช่วยวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

ผลของจำนวนกริดและคุณภาพของกริดต่อความแม่นยำในการคำนวณทาง CFD ของ
การไหลในไซโคลน

Effect of Number of Grid and Grid Quality for calculate accuracy Using CFD of Flow
inside Cyclone

บรรณ เจริญขวัญ¹, พีระพงศ์ ทีฆสกุล¹ และธวัชชัย ชรินพาณิชกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

* อีเมล job_fit@hotmail.com perapong.t@psu.ac.th และ ctawat@chula.ac.th โทร 0-7420-7036 โทรสาร 0-7421-2893

บทคัดย่อ

ไซโคลนเป็นอุปกรณ์ดักจับฝุ่น โดยเมื่ออากาศที่มีฝุ่นละอองไหลเข้าไปในไซโคลน ในแนวสัมผัสจะเกิดกระแสหมุนวนภายในไซโคลน ทำให้ฝุ่นละอองถูกเหวี่ยงไปชนกับผนังด้านข้าง ฝุ่นละอองจึงตกลงสู่ด้านล่าง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการไหลในไซโคลน ด้วยกระบวนการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method, FVM) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณจากสมการควบคุมที่คำนวณผ่านปริมาตรควบคุมหรือกริด เพื่อทำนายการไหลของของไหลในบริเวณที่ศึกษา ซึ่งการคำนวณแบบนี้กริดเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของกริด โดยการจำลองการไหลภายในไซโคลน 3 มิติ เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Slack et al. [1] โดยศึกษาจำนวนของกริดที่ 80,478, 84,015, 89,310, 125,301 และ 163,371 กริด ซึ่งคุณภาพของกริดในการคำนวณแต่ละจำนวนนั้นมีคุณภาพไม่ต่ำกว่า 80 % ของคุณภาพกริดทั้งหมดในแบบจำลอง ซึ่งผลการคำนวณพบว่า เมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้น ผลการคำนวณเข้าใกล้ค่าทดลองมากกว่าผลการคำนวณของ Slack et al. [1]

คำหลัก: กริด คุณภาพกริด ไซโคลน

Abstract

Cyclone is an aerosol particle collection device generally used as a pre-cleaner to remove large particles. When the dust-laden gas flow into the cyclone in tangential direction, a swirl motion takes place. Large particles having high inertia are collected at the inside wall due to centrifugal force. In this work, a Computational Fluid Dynamics employing Finite Volume Method was used to calculate velocities in the cyclone. Number of grid used is an important variable affecting calculation accuracy. Then the accuracy of grid was studied and comparison was made with results from experiment and simulation. The number of grid used in this work was set at 80,478, 84,015, 89,310, 125,301 and 163,371. In each case grid quality from calculation was greater than 80 % of total grid quality in the model. Results show that in-



creasing the number of grid increases accuracy of calculations. Results from the current work are generally in better agreement with the experimental results than those from the literature.

Keywords: Grid, Grid Quality, Cyclone

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย มีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากความเจริญก้าวหน้าทางอุตสาหกรรม และปัญหาจากฝุ่นละอองในอากาศก็ถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ การควบคุมฝุ่นละอองในอากาศสามารถทำได้ โดยใช้อุปกรณ์ดักฝุ่น เช่น ไซโคลน แผ่นใยกรอง เป็นต้น ไซโคลน เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคออกจากอากาศ โดยใช้แรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศหมุนวน (vortex) จึงสามารถแยกอนุภาคออกจากอากาศได้ ซึ่งไซโคลนสามารถสร้างง่าย ราคาถูก ศึกษาค้นคว้าได้ไม่ยากนัก เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ แต่ไซโคลนก็ยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถดักอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ ไม่สามารถดักหรือแยกอนุภาคฝุ่นที่มีสภาพเปียกได้ และความดันสูญเสียของอากาศที่ผ่านไซโคลนมีค่าค่อนข้างมาก [2] จากข้อจำกัดเหล่านี้จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาไซโคลน โดยการผสมผสานของกลไกการดักจับ เช่น ไซโคลนสกริมเบอร์ ที่เอาหลักการของหยดน้ำจับอนุภาคขนาดเล็กที่ไซโคลนไม่สามารถดักได้ เพื่อให้สามารถจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ด้วยหยดน้ำ และไฮโดรไซโคลน เป็นการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว [3,4]

การศึกษามรรณะของไซโคลน สามารถทำได้ทั้งในแง่การทดลองและการจำลองการไหล ซึ่งการจำลองการไหล สามารถทำได้โดยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นกระบวนการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) และวิธีนี้ยังสามารถช่วยให้ทราบไปรไฟล์การไหลของของไหล โดยเป็นประโยชน์กับงานวิจัยอย่างมากที่จะทำการพัฒนาไซโคลน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมเป็นอย่างมาก

Jollus et al. [5] ได้ทำการศึกษานาฬิกาการไหลของไซโคลน ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะการ

เคลื่อนที่ในไซโคลน และลักษณะของการเคลื่อนที่ โดยทำการจำลองการไหลแบบ Turbulent ที่เป็นแบบ re-normalization group, *RNG k-ε* กับ Reynolds stress equation model (*RSM*) ในไซโคลน 3 ขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงทรงกรวยของไซโคลน พบว่าการจำลองการไหลแบบ Reynolds stress equation model (*RSM*) ให้ผลของ Pressure drop และระดับของประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค และอนุภาคตัดไม่เบี่ยงเบนจากการทดลองมากนัก Chuah et al.[6] ได้ทำการศึกษาแนวโน้มของ Pressure drop ต่ออุณหภูมิและความเร็วที่เข้าไปในไซโคลน โดยประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) และทำการจำลองการไหลแบบ Turbulent ที่เป็นแบบ re-normalization group, *RNG k-ε* และ Reynolds stress equation model (*RSM*) โดยทดลองกับรูปร่างของไซโคลน 2 แบบ คือ Stairmand high efficiency และ Bohnel พบว่า การจำลองแบบ Reynolds stress equation model (*RSM*) ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุดกับการทดลอง กับขนาด [7] ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหลและอนุภาคขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน และความดันสูญเสียไซโคลน โดยประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) พบว่าประสิทธิภาพดักจับอนุภาคและความดันตก ที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงเป็นอย่างดี กับผลการทดลองของ Dirigo and Lelth [8] และ Yoshida [9] โดยการใช้แบบจำลอง Reynold Stress Model (*RSM*) จะให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าใช้แบบจำลอง Turbulent standard *k-ε* และ *RNG- k-ε* ทรงฤทธิ์ [10] ได้ทำการศึกษารายละเอียดเชิงตัวเลขของการไหล โดยจำลองการไหลแบบ Turbulent ในการคำนวณ โดย Turbulent ผ่านเครื่องกำเนิดการหมุนแบบท่อหมุน รอบแนวแกนแนวการคำนวณออกเป็นสองบริเวณ ที่ต่อเนื่องกัน ผลที่ได้คือ การหมุนแบบอ่อน สำหรับแบบจำลอง Rey-



Reynolds stress equation model (RSM) ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบจำลอง Turbulent standard $k-\epsilon$ และแบบจำลอง Reynolds stress equation model (RSM) แสดงโปรไฟล์ความเร็วที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี

แต่การคำนวณทางจลนพลศาสตร์ของไหลนี้ จะมีความถูกต้องแม่นยำก็ขึ้นอยู่กับหลาย ๆ อย่าง เช่น กริด แบบจำลองการไหล กระบวนการการหาค่าตอบ และการประมาณค่าภายในด้วยแบบระเบียบวิธีผลต่าง ซึ่งล้วนแต่จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม กับแบบจำลองที่จะจำลอง โดยในข้างต้นนี้งานวิจัยจึงได้ศึกษาผลของกริดที่มีผลต่อความแม่นยำในการคำนวณแบบกระบวนการทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งทำการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Slack et al. [1]

2. สมการควบคุมการไหลแบบปั่นป่วน

สมการที่ใช้ในงานวิจัยเป็นปัญหาของการไหลปั่นป่วนในสภาวะคงตัว (steady state) และอัดตัวไม่ได้ แบบ 3 มิติโดยวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งเป็นวิธีที่หาค่าความดันและความเร็วในสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องเพื่อให้สอดคล้องกัน โดยการสมมติความดันและความเร็วของปัญหาการไหล ที่พิจารณาเพื่อนำค่าความเร็วที่คำนวณได้ไปหาค่าความดันอีกครั้งโดยวิธี pressure correction ในการคำนวณที่ถูกต้อง จากนั้นนำค่าความดันมาคำนวณค่าของความเร็ว แล้วทำซ้ำตามขั้นที่ได้กล่าวมาจนผลเฉลยเข้าสู่ค่าที่กำหนด และ ระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume) ที่เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อาศัยการอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์ปริมาณควบคุมที่ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่อง และสมการนาเวียร์-สโตค ดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \tag{2}$$

3. แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM ในการคำนวณ เพราะแบบจำลองที่สามารถทำนายการไหลวนของอากาศได้ดี ซึ่งเหมาะสมกับการคำนวณการไหลในไซโคลน โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \bar{u}_i \bar{u}_j) = D_{ij} + P_{ij} + H_{ij} + \epsilon_{ij} \tag{3}$$

D_{ij} คือ การแพร่การปั่นป่วน โดยที่

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i u_j u_k} + (\overline{p u'_i}) \delta_{jk} + (\overline{p u'_j}) \delta_{ik} - \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \right] \tag{4}$$

P_{ij} คือ ผลคูณความถี่ความถี่

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \overline{u_j u_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \tag{5}$$

H_{ij} คือ ความเครียดจาก

$$H_{ij} = \rho \left(\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_i} \right) \tag{6}$$

ϵ_{ij} คือ อัตราการแพร่กระจาย

$$\epsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_k} \tag{7}$$

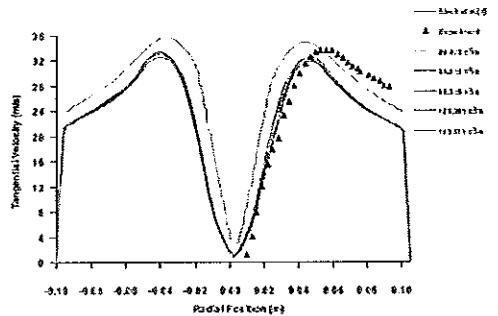
4. เงื่อนไขการจำลอง

การคำนวณในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Fluent 6.3.26 โดยใช้ขนาดไซโคลนของ Slack et al. [1] เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของ Slack et al.[1] กับผลการทดลอง โดยขนาดของไซโคลนแสดงดังรูปที่ 1 โดย รูปที่ 1 (ก) แสดงขนาดที่ D = 205 m. และรูปที่ 1 (ข) แสดงลักษณะกริดแบบจำลอง โดยทำการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม GAMBIT 2.2.30 ลักษณะของกริดเป็นสี่เหลี่ยมทั้งหมดในแบบจำลองซึ่งลักษณะของกริดในแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเหมือนแบบจำลองของ Slack et al.[1] และจากนั้นทำการเช็คคุณภาพของกริด โดยตรวจสอบการเรียงตัวของกริดภายในแบบจำลองดังรูปที่ 2 แถบสี่

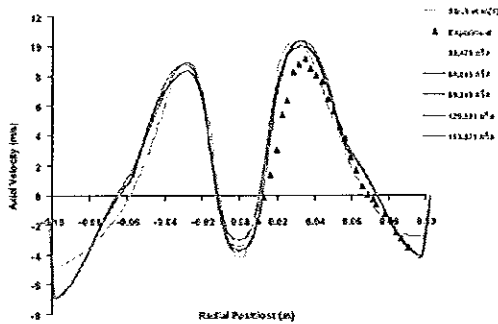


$$\frac{\sum_{i=1}^N |V_{i,cal} - V_{i,exp}|}{V_{i,exp}} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ V_{cal} คือ ความเร็วที่ได้จากการคำนวณ V_{exp} คือ ความเร็วที่ได้จากการทดลอง N คือ จำนวนค่าแห่งของความเร็วจนการคำนวณ พบว่าที่ระยะ 0.32 m. ความเร็วในแนวสัมผัส Slack et al. [1] ค่าขนาดได้นั้นมีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ 67.2% จากการเพิ่มจำนวนกริดแล้วทำการคำนวณที่ระยะเดียวกัน ความเร็วในแนวสัมผัสที่มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ 25.0% และความเร็วในแนวแกนของ Slack et al. [1] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ 88.2%



(ก)

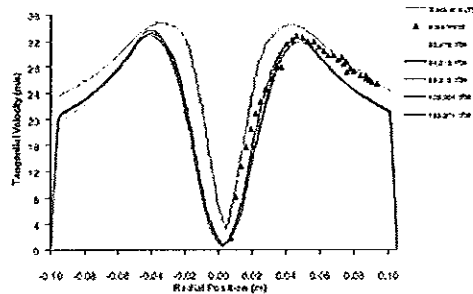


(ข)

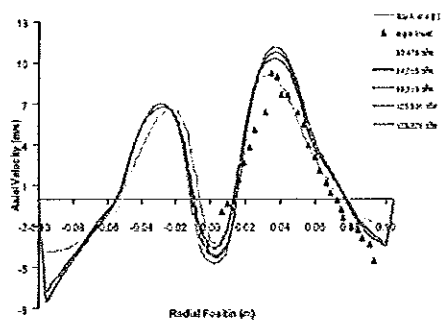
รูปที่ 5 โปรไฟล์ความเร็วตำแหน่ง 0.32 m. (ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน และความเร็วในแนวแกนของงานวิจัยนี้ที่มีความเบี่ยงเบนอยู่ที่ 86.5% ดังรูปที่ 5 ส่วนที่ระยะ 0.38 m. ความเร็วในแนวสัมผัส Slack et al.[1] ค่าขนาดได้นั้นมีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ 18.9% ความเร็วในแนวสัมผัสของงานวิจัยนี้ที่มีความเบี่ยงเบนจากการ

CST

ทดลองอยู่ที่ 12.5% และความเร็วในแนวแกนของ Slack et al. [1] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ 78.3% และความเร็วในแนวแกนของงานวิจัยนี้มีความเบี่ยงเบนคือ 151.1% ดังรูปที่ 6 ซึ่งการคำนวณของงานวิจัยนี้ความเร็วในแนวสัมผัสนั้นใกล้เคียงการทดลองมากกว่าผลการคำนวณของของ Slack et al. [1] และผลการคำนวณในแนวแกนก็มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณของ Slack et al. [1] อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากผลของคุณภาพของกริด ซึ่งคุณภาพของกริดนั้นเป็นการบอกถึงการเรียงตัวและการเชื่อมต่อของกริดในแบบจำลอง โดยโครงสร้างของกริดทำให้การคำนวณในรูปของเมตริกซ์ง่ายขึ้นเพราะสามารถ



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ความเร็วตำแหน่ง 0.38 m. (ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน

อ้างอิงจากพิกัดจากง่ายขึ้น และกริดเป็นตัวแทนย่อยๆ ของแบบจำลองที่ถูกคำนวณผ่านสมการควบคุม ดังนั้นจำนวนและการเรียงตัวของกริดส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณค่าขนาด และจำนวนกริดก็ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณเช่นกัน เพราะ



จากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าความเร็วในแนวสัมผัสเข้าใกล้ การทดลองมาก เนื่องมาจากจำนวนการเรียงตัวของ กริดในการคำนวณความเร็วแนวสัมผัสหรือของ งานวิจัยมีมากกว่าของ Slack et al. [1] ดังนั้นความ แม่นยำในการคำนวณก็ขึ้นอยู่กับจำนวนการเรียงตัว ของกริดในแบบจำลอง โดยแต่ละช่วงในแบบจำลอง ความละเอียดของกริดก็มีผลในการคำนวณ และบาง ช่วงอาจไม่มีความละเอียดมากการคำนวณก็ ใกล้เคียงกับการทดลอง

6. สรุป

จากผลการคำนวณของแบบจำลองไซโคลน โดยนำผลมาเปรียบเทียบกับของ Slack et al. [1] จำนวนของกริดและการเรียงตัวของกริดในแบบจำลอง นั้นส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้เขียน ขอขอบพระคุณศูนย์กริด มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์ให้ส่ง งานวิจัยนี้ไปประมวลผลในศูนย์กริด

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Slack, M.D., Prasad, R.O., Bakker, A. and Boysan, F., (2000). Advances in cyclone modelling using unstructured grid, *Chemical Engineers Research and Design*, vol. 78(8), November 2000, pp. 1098-1104

[2] ปราโมช เขียวชาญ (2552). *อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดอนุภาค*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-5.PDF

[3] ตามาตร พรเจริญ (2546). *การเก็บฝุ่นขนาดเล็กด้วยไซโคลนสกริมเบอร์*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเกล้าธนบุรี, หน้า 6-18.

[4] ธรรมบุญ จันทร์ปรียากุล (2550). การจำลองแบบประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคที่มีความยืดหยุ่นด้วยไฮโดรไซโคลน, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17* โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

CST

[5] Chuah, T.G., Gimbut, J.L. and Choong, S.Y., (2006). A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics, *Powder Technology*, vol. 162(2), March 2006, pp. 126 – 132.

[6] Gimbut, J.L., Chuah, T.G., Fakhru I-Razi, A. and Choong S.Y., (2005). The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44(1), January 2005 pp. 7–12.

[7] กัมปนาท แก้วปลั่ง 2547. *การจำลองการเคลื่อนที่ 3 มิติ ของอนุภาคเดี่ยวตามการไหลแบบปั่นป่วนใน ก๊าซไซโคลนแบบเป่าลง*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 4-91.

[8] Dirgo, J. and Leith, D., (1985). Cyclone collection efficiency : Comparison of experimental Results with theoretical predictions, *Aerosol science and technology*, vol. 4 December 1985, pp. 401-415

[9] Yoshida, H., (1996). Three-dimensional simulation of air cyclone and particle separation by a revised-type cyclone, *Colloids and surfaces*, vol. 109 April 1996, pp. 1-12

[10] ทรงฤทธิ์ ตันชะวาล, ปุยมยศ วลัยกุล และ บัณฑิต พึ่งธรรมสาร, 2545. *การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลหมุนวนเทอร์บิวเลนซ์:กรณีเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนรอบแนวแกน*, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 2 ฉบับที่ 3.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายนเรศ เจริญขวัญ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120023		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว และแปรสภาพ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2551	

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนผู้ช่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี 2551-2553
2. ทุนอุดหนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี 2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

นเรศ เจริญขวัญ, พีระพงศ์ ทัณสกกุล และธวัชชัย ชรินพาณิชกุล. 2552. ผลของจำนวนกริด และคุณภาพของกริดต่อความแม่นยำในการคำนวณทาง CFD ของการไหลในไซโคลน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552. เชียงใหม่ CST-026079 หน้า 159.