ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การปรับปรุงกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง

Flocking Process Improvement in Latex Glove Industry

นามผู้วิจัย นายปิยวุฒิ แก้วฤทธิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(รองศาสตราจารย์สมาน เจริญกิจพูลผล, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง

Flocking Process Improvement in Latex Glove Industry

โดย

นายปิยวุฒิ แก้วฤทธิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2552

ปิยวุฒิ แก้วฤทธิ์ 2552: การปรับปรุงกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 79 หน้า

การพ่นเส้นใยฝ้ายเป็นกระบวนการสำคัญของอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง ซึ่งกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายนี้จะเกิดของเสียประมาณ 35 % งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง ซึ่งถือว่ากระบวนการนี้เป็นปรากฏการณ์การไหลแบบหลายเฟส โดยทำการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งพิจารณาโดเมนของแบบจำลองสามมิติด้วยวิธีการ Eulerian-Lagrangian โดยแบ่งเป็นการจำลองการไหลของของไหลหลัก (อากาศ) ซึ่งใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k-ε ในขณะที่การจำลองการเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายจะใช้วิธีการพิจารณาแบบ Lagrange และ Stochastic tracking with Discrete Random Walk (DRW) โดยทำการจำลองระบบการพ่นเส้นใยฝ้ายแบบต่างๆ 13 แบบ และทำการสร้างแบบจำลองห้องพ่นเส้นใยฝ้าย โดยใช้แผ่นพลาสติกใส(Perspex) หนา 8 mm ขนาดกว้าง 1074.5 mm ยาว 833.5 mm สูง 1180 mm และทำการพ่นเส้นใยฝ้ายลงบนถุงมือยางจำลอง ผลการทดลองจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ เพื่อประเมินความถูกต้องของโปรแกรมและผลการปรับปรุง โดยในการศึกษา กำหนดให้อากาศไหลเข้ามีความเร็วเฉลี่ย 4.5 m/s มีการพ่นอนุภาคเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 μm ด้วยอัตราการไหลโดยมวล 0.01 kg/s จากการศึกษาพบว่าโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถทำนายการไหลแบบสองเฟสที่เกิดขึ้นในห้องพ่นเส้นใยฝ้ายได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 15 % และเมื่อกำหนดให้แผ่นปรับรูปแบบการไหล(Damper) ที่ติดตั้งตรงทางออกของช่องการไหลด้านข้างเอียงทำมุม 40 องศา กับแนวช่องเพื่อหลีกเลี่ยงผลของการไหลในช่องการไหลกลาง จะทำให้การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายมากขึ้น 15 % และสามารถลดปริมาณเส้นใยที่เป็นของเสียลงได้ 29 % ของกระบวนการเดิม

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Piyawut Kaewrit 2009: Flocking Process Improvement in Latex Glove Industry. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 79 pages.

The flocking is an important process in latex glove industry and has complicated multiphase flow phenomenon. About 35 % wastes are produced by this process. This paper presents a numerical study of flock particle flow inside the flock cabinet using commercial software of Computational Fluid Dynamics (CFD). Flow inside flock cabinet was modeled in three-dimensional domain with Eulerian-Lagrangian method. The standard k-ε with standard wall functions was solved for the continuous phase while the discrete phase (particle) was modeled based on Lagrange approach and Stochastic tracking with Discrete Random Walk (DRW). The 13th flocking process models were studied. The experiment was performed to validate and confirm a process improving results. In the experiment, The air was delivered with average velocity of 4.5 m/s and the uniform flock with equivalence diameter of 50 μm was injected into the cabinet at the rate of 0.01 kg/s. Velocity, pressure, trajectory, accretion and waste of flock particle were measured. From the results obtained, it was found that the CFD can predict the two phase flow inside the flock cabinet and had an error less than 15 %. To reduce the effect of flow in center channel, the dampers at outlet of nearby channels were adjusted to make an angle of 40° to the flow direction. With these adjustments, it could increase the flock accretion approximately 15 % and could reduce waste at least 29 % compare to those before adjustment. This result is an improve in efficiency of the flocking process.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและวางแผนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ที่เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้มาโดยตลอดจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้องทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณ ฤทธิณรงค์ จันทรสุข ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและตัวอย่างชิ้นงานสำหรับสร้างชุดทดลอง ตลอดจนคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชาย และญาติพี่น้องทุกคน ที่ได้แนะนำและให้กำลังใจในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วยดีเสมอมา

ปิยวุฒิ แก้วฤทธิ์

เมษายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	76
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงกลุ่มของการไหลแบบหลายเฟส	9
2	สภาวะเงื่อนไขขอบเขต	47
3	ตำแหน่งและมุมองศาของแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper)	49
4	แสดงอัตราการเกาะตัวบนพื้นที่ผิวของชุดแม่พิมพ์ถุงมือยาง	59
5	แสดงเปอร์เซ็นต์การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายบนพื้นที่ผิวของชุดแม่พิมพ์ถุงมือยางของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	70

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงระบบการพ่นเส้นใยฝ้ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงาน	3
2	แสดงระบบการพ่นเส้นใยฝ้ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงาน	4
3	แสดงกระบวนการผลิตถุงมือยาง	8
4	รูปแบบของมวลที่เดินทางผ่านกรอบขนาดเล็ก	15
5	รูปแบบของแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก	16
6	พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด *dx* และ *dy*	18
7	การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน	20
8	กริดมีโครงสร้าง (Structure Grid)	32
9	กริดไม่มีโครงสร้าง (Unstructure Grid)	33
10	แม่พิมพ์ของถุงมือเบอร์ 8	39
11	แบบจำลองสามมิติทางคอมพิวเตอร์ของแม่พิมพ์ถุงมือเบอร์ 8	39
12	ชุดแม่พิมพ์ถุงมือ (Glove pattern)	40
13	การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	41
14	ชุดพ่นเส้นใยฝ้าย (Flock feeder)	42
15	เส้นใยฝ้าย (Flock)	42
16	แบบจำลองห้องพ่นเส้นใยฝ้ายที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องจำกัดแสง	43
17	แผนผังวิธีการวิจัย	44
18	ตำแหน่งและรูปแบบการปรับมุมองศาของแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper)	45
19	แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสามมิติและขอบเขตของห้องพ่นเส้นใยฝ้าย	46
20	ตัวอย่างการวัดค่าความเร็วในแนวแกน Y และความดัน ภายในของห้องพ่นเส้นใยฝ้าย	48
21	ตำแหน่งและรูปแบบการปรับมุมองศาของแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper)	50
22	แสดงการเปลี่ยนรูปแบบช่องการไหลกลางของแบบจำลอง SM2	50
23	ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ้นเส้นใย S20T	53
25	ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด G และ H ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T	53
26	ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T	54
27	ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T	55
28	ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด G และ H ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T	55
29	การเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T	57
30	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T	58
31	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ ของแบบจำลองห้องพ้นเส้นใย S20T	58
32	แสดงอัตราการเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย บนแม่พิมพ์ถุงมือยางจากการจำลอง	60
33	แสดงสัดส่วนร้อยละของการใช้ของเส้นใยฝ้าย ในการจำลองการพ่นเส้นใย	61
34	ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	62
35	ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	63
36	ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด Gm และ Hm ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	63
37	ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	65
39	ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด Gm และ Hm ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	65
40	การเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B	66
41	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ Pattern-C	67
42	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ Pattern-C	67
43	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ Pattern-L	68
44	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ Pattern-L	68
45	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ Pattern-R	69
46	การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ Pattern-R	69

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_D	=	สัมประสิทธิ์ฉุด
$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$	=	ค่าคงที่ของพจน์แหล่งกำเนิดและแหล่งรับ ของสมการ ε
C_μ	=	ค่าคงที่ของแบบจำลองแบบความหนืดไหลวนเชิงเส้น
dx, dy, dz	=	อนุพันธ์ในแนวแกน X, Y และ Z
d_p	=	ขนาดของอนุภาค
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่, ขนาดของอนุภาค
D_h	=	Hydraulic diameter
f_x, f_y	=	แรงอื่นๆ ในแนวแกน
F_D	=	แรงฉุด
g	=	แรงโน้มถ่วง
G_k	=	พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย
G_b	=	พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว
k	=	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
L	=	ระยะห่างระหว่างอนุภาค
p	=	ความดัน
Re	=	เลขเรย์โนลด์
Re_t	=	เลขเรย์โนลด์ของความปั่นป่วน
S_k, S_ε	=	พจน์แหล่งกำเนิด ของ k และ ε
t	=	เวลา
T	=	อุณหภูมิ
T_{ij}	=	เทนเซอร์ความเค้น
u_i, u_j	=	องค์ประกอบความเร็วในทิศทาง i หรือ j
$\overline{u_i' u_j'}$	=	Reynolds stresses
x_i, x_j	=	Coordinate components
Y_M	=	ค่าการกดอัดได้
Z	=	อัตราส่วนเชิงมวล
Z_i	=	ระยะใดๆ ในแนวแกน Z
Z_0	=	ระยะในแนวแกน Z

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Greek symbols

ε	=	การกระจายพลังจลน์ของความปั่นป่วน
α_d, α_c	=	อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาค (เส้นใยฝ้าย), ของไหลหลัก (อากาศ)
μ	=	ความหนืดพลวัต
μ_d, μ_c	=	ความหนืดพลวัตของอนุภาค (เส้นใยฝ้าย), ของไหลหลัก (อากาศ)
μ_t	=	ความหนืดจลน์ของความปั่นป่วน
ρ	=	ความหนาแน่น
ρ_d, ρ_c	=	ความหนาแน่นของอนุภาค (เส้นใยฝ้าย), ของไหลหลัก (อากาศ)
σ_k	=	ค่า Prandtl number ของ k
σ_ε	=	ค่า Prandtl number ของ ε
τ_p	=	Particle time constant
τ_f	=	fluid time scale
τ_{ij}	=	ความเค้นเฉือนบนพิกัดฉาก
Ω_{ij}, $\bar{\Omega}_{ij}$	=	เทนเซอร์การหมุนวนเฉลี่ย (mean rate-of-rotation tensor)

คำย่อ

CFD	=	Computational fluid dynamics
DRW	=	Discrete Random Walk
dtex	=	หน่วยการวัดทางเส้นใย: ย่อมาจาก Decitex โดยคิดเป็น 1 กรัม: 10000 เมตร
LES	=	Large Eddy Simulation
RNG	=	Renormalization group
UDF	=	User define function

การปรับปรุงกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง

Flocking Process Improvement in Latex Glove Industry

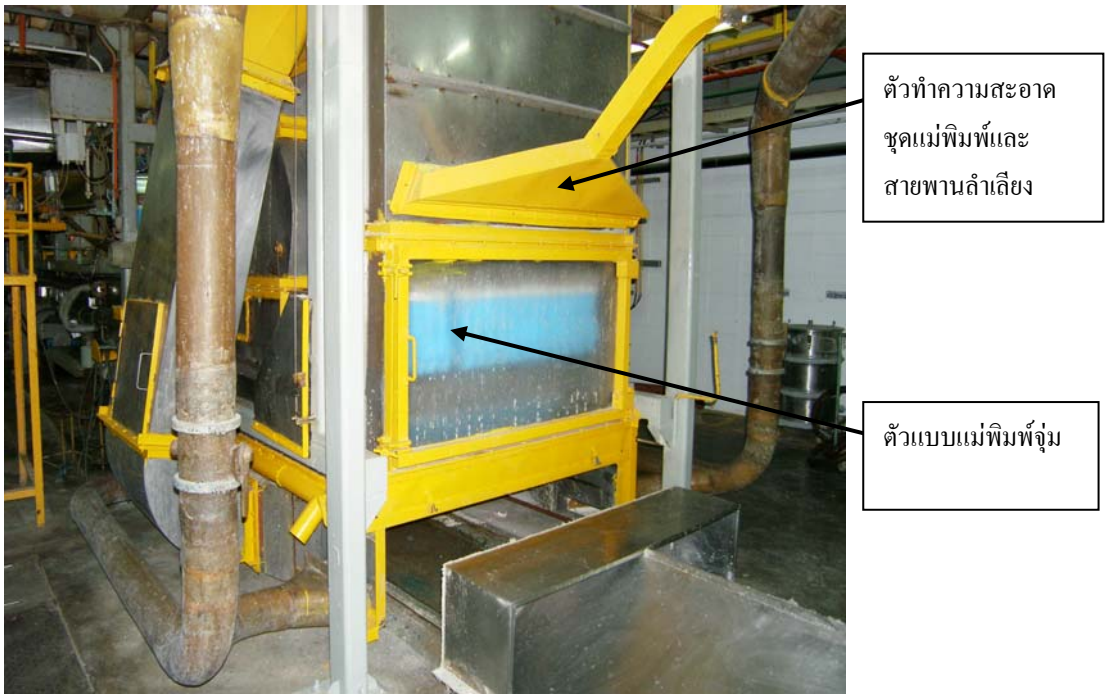
คำนำ

ในยุคที่เทคโนโลยีก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดดและข้อตกลงการค้าระหว่างประเทศในรูปแบบต่างๆ ทำให้ธุรกิจต่างๆ ต้องแข่งขันกันสูงมากขึ้นโดยเฉพาะผู้แข่งขันจากต่างชาติ ซึ่งมีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้า ทำให้ผู้ประกอบการธุรกิจต่างๆจำเป็นจะต้องมีการปรับตัวเพื่อให้สามารถแข่งขันอยู่ในตลาดได้ต่อไป อุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยางก็เป็นอุตสาหกรรมสำคัญของประเทศไทยแบบหนึ่งที่ต้องมีการปรับตัว เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพในด้านต่างๆ สูง โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพาราทั้งหมดประมาณ 15,349,523 ไร่ (กรมวิชาการเกษตร, 2552) ทำให้ประเทศไทยกลายเป็นผู้ผลิตน้ำยางดิบที่สามารถผลิตน้ำยางดิบมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยในปีพุทธศักราช 2550 สามารถผลิตได้ถึง 3,056,005 ตัน อีกทั้งค่าแรงงานของประเทศไทยต่ำ ทำให้ได้รับความสนใจจากนักลงทุน ในปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตถุงมือยางอยู่ประมาณ 63 แห่ง (ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย, 2006) มากกว่า 80% เป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กซึ่งเป็นของคนไทย โดยมีมูลค่าการส่งออกรวมถึง 27,287.84 ล้านบาท แต่ก็มีการนำเข้าปีละประมาณ 671.26 ล้านบาท ถุงมือยางที่มีการผลิตในปัจจุบันจะแบ่งออกได้เป็นถุงมือยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber) และน้ำยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) และยังแบ่งตามการใช้งานโดยแบ่งเป็นถุงมือแบบที่ใช้ในครัวเรือน (household latex gloves) ถุงมือยางสำหรับงานทางการแพทย์ (medical latex gloves) และถุงมือยางสังเคราะห์ (synthetics rubber gloves) ที่ใช้กับงานเฉพาะทาง เทคโนโลยีที่ใช้ในอุตสาหกรรมถุงมือยางนั้นโดยส่วนมากแล้วจะมีกระบวนการพื้นฐานเหมือนกัน คือ จะใช้ระบบแม่พิมพ์จุ่ม (Dipping mold) โดยในขั้นแรกนั้นจะเป็นการทำความสะอาดและปรับสภาพผิวของแบบแม่พิมพ์ก่อน จากนั้นจะนำแบบ แม่พิมพ์ไปจุ่มน้ำยางแล้วให้ความร้อนเพื่อให้น้ำยางแข็งตัว หลังจากนั้นจะส่งไปผ่านน้ำคลอรีนเพื่อปรับผิวด้านในของถุงมือยาง ทำความสะอาดแล้วถอดออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปผ่านคลอรีนอีกครั้งเพื่อปรับสภาพผิวด้านนอกของถุงมือและเข้าสู่กระบวนการอบแห้งขั้นสุดท้าย นอกจากนี้ยังมีถุงมือแบบที่ใช้ในครัวเรือนบางชนิด ใช้เส้นใยฝ้าย (cotton flock) เคลือบผิวด้านในของถุงมือแทนการปรับผิวด้วยคลอรีน เพื่อไม่ให้ถุงมือติดกับผิวหนัง อีกทั้งยังเป็นการช่วยดูดซับเหงื่ออีกด้วย

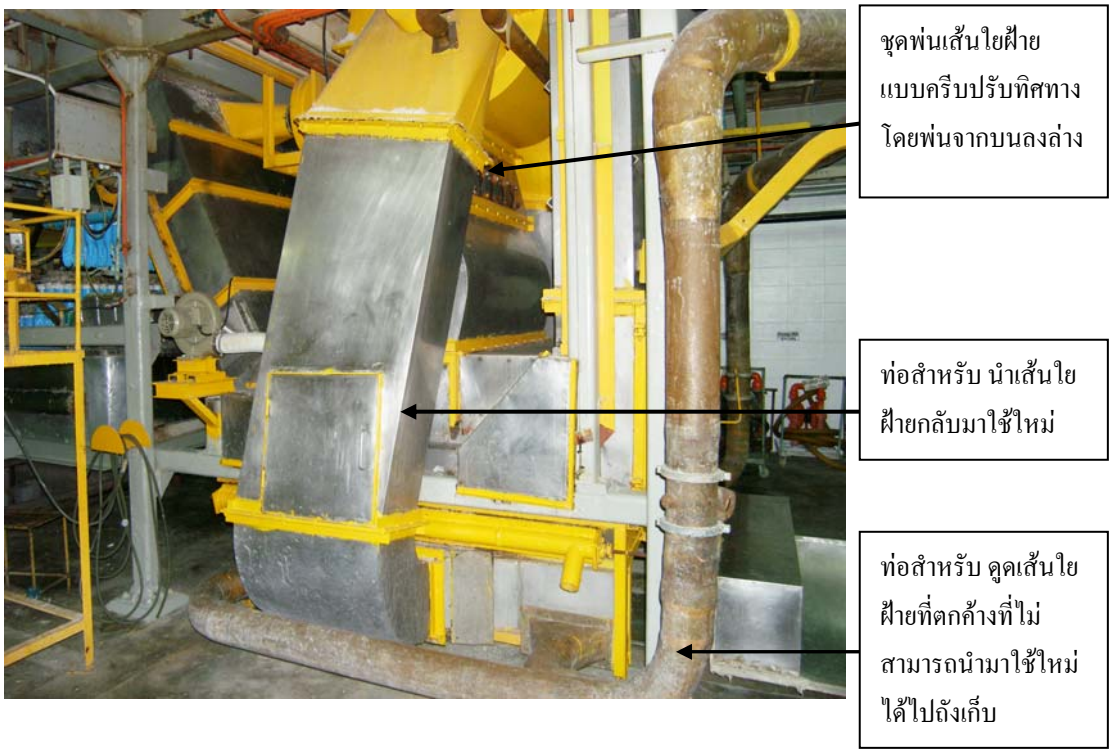
บริษัทผู้ผลิตถุงมือยางเพื่อการส่งออกแห่งหนึ่งในประเทศไทย มีการผลิตผลิตภัณฑ์ถุงมือแบบที่ใช้ในครัวเรือน (Household latex gloves) ถุงมือยางสำหรับงานทางการแพทย์ (medical latex gloves) และถุงมือยางสังเคราะห์ (synthetics rubber gloves) ที่ใช้กับงานเฉพาะทาง โดยกระบวนการผลิตนั้น จะใช้หลักการของแม่พิมพ์จุ่ม (Dipping mold) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยาง โดยในกระบวนการผลิตถุงมือแบบที่ใช้ในครัวเรือนนั้นทางบริษัทได้ทำการผลิตออกมาสองรูปแบบหลักๆ คือ แบบที่มีการปรับผิวด้านในถุงมือด้วยคลอรีนและแบบที่ทำการเคลือบผิวด้านในของถุงมือโดยใช้เส้นใยฝ้าย (cotton flock) เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายให้ผู้ใช้งาน ทำให้ถุงมือไม่ติดกับผิวหนังเมื่อสวมใส่และถอดง่าย อีกทั้งเส้นใยฝ้ายยังช่วยดูดซับเหงื่อ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการผลิตถุงมือที่มีการเคลือบผิวด้านในด้วยเส้นใยฝ้าย คือ เส้นใยฝ้ายไม่สามารถเกาะติดผิวด้านในของถุงมือได้อย่างสม่ำเสมอ บางบริเวณมีการกระจุกตัวของเส้นใยฝ้ายมาก ในขณะที่บางบริเวณมีเส้นใยฝ้ายมาเกาะน้อยกว่าปริมาณที่กำหนด ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความพึงพอใจของลูกค้า อย่างไรก็ตามทางบริษัทได้พยายามหาทางแก้ไขโดยทำการปรับปรุงกระบวนการผลิต ด้วยการติดตั้งแผ่นปรับทิศทางการไหลของอากาศที่เป็นตัวพาเส้นใยฝ้ายให้ไหลผ่านตัวแบบแม่พิมพ์ถุงมือให้ทั่วถึงขึ้น ปรับมุมแบบแม่พิมพ์ถุงมือรับการพ่นของเส้นใยฝ้ายในทิศทางต่างๆและเพิ่มปริมาณเส้นใยฝ้ายที่พ่นเข้าแบบแม่พิมพ์ถุงมือ ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2 แต่ผลที่ได้ก็ยังไม่เป็นที่พึงพอใจ การกระจายตัวของเส้นใยฝ้ายยังไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร ผลิตภัณฑ์ที่ได้บางส่วนไม่ผ่านกระบวนการตรวจสอบคุณภาพ นอกจากนี้เส้นใยฝ้ายที่ไม่ได้เกาะที่ผิวด้านในของถุงมือ ก็จะไปตกค้างอยู่ตามสายพานลำเลียงเนื่องจากสายพานลำเลียงทำงานเป็นวัฏจักร หากปล่อยให้เส้นใยฝ้ายเกาะอยู่บนสายพานลำเลียงเส้นใยฝ้ายก็จะไปตกลงในอ่างสารเคมีและอ่างน้ำยางกลายเป็นสิ่งปนเปื้อนต้องกำจัดด้วยการเป่าทิ้งด้วยอากาศอัดเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม อีกทั้งเส้นใยฝ้ายนี้ยังไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นส่งผลถึงความสามารถในการแข่งขันในตลาด

ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่จะออกแบบและพัฒนาระบบ flocking โดยจะทำการศึกษาและวิเคราะห์การไหลของอากาศที่ผสมเส้นใยฝ้ายและการกระจายตัวของเส้นใยฝ้ายในกระบวนการ flocking โดยอาศัยโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) ช่วยในการศึกษาวิเคราะห์และประมวลผล ผลการวิเคราะห์จะทำให้ทราบรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของเส้นใยฝ้าย เพื่อนำมาปรับปรุงวิธีการซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการลองผิดลองถูกทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย สำหรับการวิเคราะห์นี้จะใช้การวิเคราะห์ของไหลที่มีสองเฟส(Two phase flow) และวิเคราะห์ในลักษณะสามมิติซึ่งมีความซับซ้อน ผลที่ได้จาก

การวิเคราะห์โดยโปรแกรม ทั้งการกระจายความดัน การกระจายความเร็วที่บริเวณต่างๆ ที่อากาศผสมเส้นใยฝ้ายไหลผ่าน รวมถึงทิศทางการไหลจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการไหลที่ทำให้เกิดปัญหา และหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการไหลของอากาศผสมเส้นใยฝ้าย โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบ Flocking ในกระบวนการผลิตเพื่อให้เกิดการเกาะของเส้นใยฝ้ายได้อย่างสม่ำเสมอ ลดของเสียที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ปริมาณการผลิตเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตสามารถลดต้นทุนการผลิตและสามารถแข่งขันทางด้านราคาในตลาดโลกได้



ภาพที่ 1 แสดงระบบการพ่นเส้นใยฝ้ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงาน



ภาพที่ 2 แสดงระบบการพ่นเส้นใยฝ้ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงาน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศผสมเส้นใยฝ้ายที่ไหลผ่านแผ่นจัดเรียงการไหลและแม่พิมพ์ ของกระบวนการเคลือบผิวด้านในของถุงมือ (flocking process) โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD)

2. ทำการศึกษาและออกแบบปรับปรุงให้เครื่อง Flocking มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพการกระจายตัวของเส้นใยฝ้ายสม่ำเสมอ

3. เพื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทำการศึกษา มาออกแบบปรับปรุงระบบการพ่นเส้นใยฝ้าย ในกระบวนการเคลือบผิวในของถุงมือ (flocking process) เพื่อให้ได้ถุงมือที่มีคุณภาพมากขึ้น ลดของเสียที่เกิดขึ้นและต้นทุนในกระบวนการผลิต

การตรวจเอกสาร

การพ่นเส้นใยและเส้นใย

การพ่นเส้นใยฝ้ายเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตถุงมือยางแบบที่มีการเคลือบผิวด้านในของถุงมือด้วยเส้นใยฝ้าย โดยวัตถุประสงค์ก็เพื่อความรู้สึกสบายเมื่อสวมใส่ถุงมือ อีกทั้งยังช่วยในการดูดซับเหงื่อของผู้สวมใส่อีกด้วย กระบวนการผลิตถุงมือยางสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3 การพ่นเส้นใยฝ้ายเป็นขั้นตอนที่จะเกิดในตู้พ่นเส้นใยฝ้าย (Flock Cabinet) โดยแม่พิมพ์ของถุงมือยางที่ผ่านการจุ่มน้ำยางครั้งที่สอง ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานระหว่างผิวของถุงมือหลังจากการจุ่มครั้งแรกกับเส้นใยฝ้าย โดยเส้นใยฝ้ายจะถูกพ่นโดยอาศัยอากาศเป็นตัวพาเส้นใยเพื่อเคลือบผิวด้านในของถุงมือ

เส้นใย (Flock) เป็นเส้นใยเชิงเดี่ยวที่ผ่านการปั่นหรือสับให้มีขนาดสั้นลง โดยจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยธรรมชาติ ซึ่งได้จากฝ้ายและเส้นใยสังเคราะห์ ที่ได้จากโพลีเมอร์ เช่น ไนล่อน เรยอน หรือโพลีเอสเตอร์ โดยเส้นใยเหล่านี้จะถูกตัดเป็นเส้นขนาดความยาวประมาณ 0.3-5.0 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.7-22 dtex มีความหนาแน่นประมาณ 1.6488 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

น้ำยาง

น้ำยางสด (ศูนย์การศึกษานอกโรงเรียนภาคใต้, 2550) เป็นสารที่มีชีวิตจะประกอบด้วย เนื้อยาง โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เกลือแร่ และน้ำเป็นส่วนใหญ่ น้ำยางสดมักเก็บไว้ได้ไม่นานก็จะเกิดการบูดซึ่งจะคล้ายๆ กับน้ำนม เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ปะปนในน้ำยางจะย่อยสลายสารอาหารเกิดเป็นกรดและจะเน่าเสียในที่สุด ปกติแล้วน้ำยางสดจะมีปริมาณเนื้อยางแห้งเพียงร้อยละ 30-35 เท่านั้น จึงไม่แนะนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะความไม่สะดวกหลายๆ ประการ ดังนั้น น้ำยางสดจึงมักนำไปแปรรูปเป็นวัตถุดิบยางขั้นต้น เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง STR XL และยางแท่ง STR 5L เป็นต้น แล้วนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่อไป

น้ำยางข้น ได้จากการนำน้ำยางสดมาเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเนื้อยางและหางน้ำยางออกจากกัน ก็จะได้น้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งโดยเฉลี่ยร้อยละ 60 ดังนั้น น้ำยางข้นจึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่ค้อยไปกว่ายางแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีปริมาณการส่งออกในรูปน้ำยางข้น เป็นอันดับ 3 รองจากยางแผ่นรมควันและยางแท่งตามลำดับ และจากสถิติยางประเทศไทยปี 2546 พบว่า การนำน้ำยางข้นมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ภายในประเทศมีเพียงร้อยละ 19 เท่านั้น ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้แก่ ถุงมือยาง ยางฟองน้ำ ยางยืด ตุ๊กตายาง ถุงยางอนามัย หัวนมยาง ลูกโป่ง เครื่องมือทางการแพทย์หรือทางวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

น้ำยางข้นชนิดที่ผลิตในประเทศไทย เป็นน้ำยางข้นจากกรรมวิธีการใช้เครื่องปั่น (Centrifuge–concentrated latex) ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ

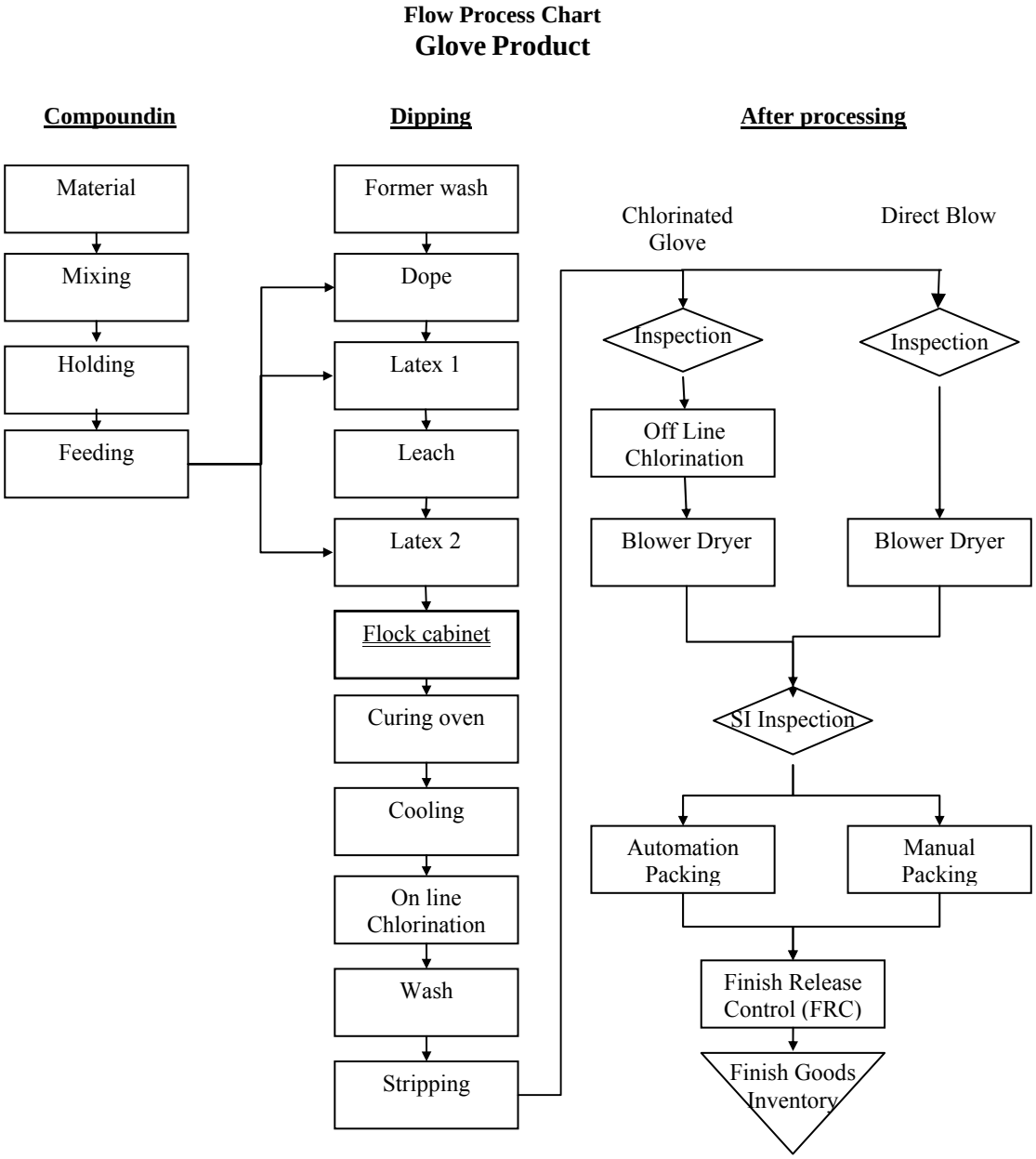
1. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia, HA) เป็นน้ำยางข้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.7% ร่วมกับกรดลอริค 0.035% น้ำยางชนิดนี้มีข้อดีคือมีอายุการเก็บน้ำยางได้นานเป็นปี ไม่เสียง่ายจึงมักนำไปผลิตถุงมือยาง กาวยาง ถุงยางอนามัย เป็นต้น ยกเว้นยางฟองน้ำ เนื่องจากแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำยางจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดเจลหรือเกิดฟองในน้ำยาง ทำให้ได้ฟองน้ำที่ด้อยคุณภาพ

2. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia, LA) เป็นน้ำยางข้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย0.2% ร่วมกับทีเอ็มทีดี 0.013% ร่วมกับ ซิงค์ออกไซด์ 0.013% ร่วมกับกรดลอริก 0.035% ศัพท์วิชาการยางพาราใช้กันว่า LA-TZ ย่อมาจาก Low Ammonia-Tetramethyl-thiuram disulphide/Zine oxide

การไหลแบบหลายเฟส

การไหลต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติหรือการไหลในอุปกรณ์ต่างๆ พบว่า บางส่วนเป็นการไหลแบบหลายเฟส (Multi phase) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นก๊าซ ของเหลวหรือของแข็ง (อนุภาค) เช่น การตกตะกอนของดินโคลน การไหลของผงถ่านหินในท่อลำเลียง การกระจายตัวของอนุภาคในระบบลดความชื้นแบบ Fluidize bed การเดือดของน้ำและอื่นๆ (Versteeg and Malalasekera, 1995) การไหลแบบหลายเฟสสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม (Crowe *et al*., 1998) ดังตารางที่ 1

เนื่องจากการศึกษาการไหลในอุปกรณ์เหล่านี้มีความยุ่งยากซับซ้อน การจำลองการไหลโดยใช้คอมพิวเตอร์จึงได้รับความสนใจมากขึ้น และความสามารถของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันก็มีความสามารถสูงขึ้นมาก ทำให้การนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานสะดวกมากขึ้น มีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ โดยในการจำลองการไหลนั้นจะใช้การคำนวณแบบ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) ในการคำนวณ ซึ่งการจำลองการไหลโดยใช้ CFD นั้นมีประโยชน์อย่างมาก จึงมีการประยุกต์ใช้กับการไหลแบบต่างๆ มากมาย



ภาพที่ 3 แสดงกระบวนการผลิตถุงมือยาง

ตารางที่ 1 แสดงกลุ่มของการไหลแบบหลายเฟส

รูปแบบการไหล	ตัวอย่าง
อากาศ-ของเหลว	- ฟองอากาศในน้ำ (Bubbly Flows)
Gas-Liquid	- การไหลแบบแยกชั้นในท่อ (Separated Flows)
	- การไหลของอากาศที่มีความชื้น(หยดน้ำ) (Gas-droplet Flows)
อากาศ-ของแข็ง	- ระบบลำเลียงโดยใช้ลม (Gas-particle Flows)
Gas-Solid	- อุปกรณ์ด้านฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized beds)
ของเหลว-ของแข็ง	- การไหลของซีเมนต์ (Slurry Flows)
Liquid- Solid	- ระบบลำเลียงโดยใช้น้ำ (Hydro transport)
	- การตกตะกอนของอนุภาค (Sediment transport)
การไหลแบบสามสถานะ	- ฟองอากาศในการไหลของซีเมนต์ (Bubbles in a slurry Flows)
Three Phase Flow	- การไหลที่เกิดหยดน้ำระบบลำเลียงโดยใช้ลม (Droplets/particles in gaseous Flows)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vuthaluru *et al*. (2004) ทำการศึกษาการไหลในระบบของเครื่องบดถ่านหิน (Coal pulveriser) เพื่อศึกษาการไหลของอากาศและการเคลื่อนที่ของอนุภาคถ่านหินที่ผ่านการบด ภายในเครื่องบดถ่านหิน และผลของตัวกระจายลม(Air-distributor vane) เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงเครื่องบดที่มีความซับซ้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การศึกษาจะใช้โปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent ในการศึกษาการไหลแบบหลายเฟส การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนของแต่ละเฟสจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-ε และใช้ Eulerian-Eulerian Approach ในการคำนวณ โดยทำการศึกษาการไหลในช่วงที่มีเลขเรย์โนลด์ 50,000-100,000 จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าความเร็วของอากาศที่บริเวณขอบนอกของตัวเครื่องบดจะมีความเร็วสูง ส่งผลให้อนุภาคของถ่านหินในบริเวณนี้มีปริมาณมากกว่าบริเวณอื่น โดยอนุภาคขนาด 100 μm มีการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการไหลของก๊าซได้ดี ส่วนอนุภาคขนาด 500 μm อนุภาคเคลื่อนที่เบี่ยงเบนออกจากทิศทางการไหลของก๊าซ เมื่อนำผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของเครื่องที่ใช้งานจริงมาเปรียบเทียบพบว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน

Mazur *et al.* (2004) นำโปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent มาวิเคราะห์การไหลของไอน้ำที่ไหลผ่านบายพาสวาล์ว และศึกษาถึงการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของบายพาสวาล์ว ในการศึกษาการไหลที่เกิดขึ้นภายในบายพาสวาล์วซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วน จะใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน แบบ Renormalization Group k-ε ในส่วนของการศึกษาการไหลของอนุภาคของแข็งจะพิจารณาด้วย Lagrange approach และใช้วิธีการของ Discrete Random Walk (DRW) ซึ่งจะรวมแบบจำลองการสึกกร่อนของ Finnie ที่ใช้กับวัสดุอ่อน (ductile material) ในการศึกษาจะพิจารณาผลของอนุภาคของแข็งขนาด 100 μm จากการศึกษาพบว่าการปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลภายในบายพาสวาล์ว รวมถึงมุมปะทะของอนุภาค จะช่วยลดการสึกกร่อนของบายพาสวาล์วได้ถึง 51% และยังยืดอายุการบำรุงรักษาได้เป็น 100 %

Hidayat *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาการไหลของก๊าซและอนุภาคของแข็งที่ไหลผ่านท่อโค้งรูปตัวยู (U-bend) ที่ใช้ในระบบลำเลียงผงถ่านหินด้วยลม (Pneumatics conveying dryer system) โดยใช้โปรแกรมด้าน CFD, Fluent 6.0 ในการศึกษาจะใช้สมการการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Realizable k-ε และ Non-equilibrium wall function การคำนวณส่วนของอนุภาคของแข็ง (discrete phase) จะใช้ การคำนวณแบบ Eulerian-Eulerian จากการศึกษาผู้วิจัยได้ศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาค (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.00025-0.001 เมตร) ความหนาแน่นของอนุภาค(600-1000 kg/m^3) อัตราส่วนปริมาตร(0.001-0.01) ความเร็วก๊าซ (10-25 m/s) และอัตราส่วนรัศมีความโค้งของท่อ (4-12) พบว่า พารามิเตอร์เหล่านี้มีผลต่อ slip velocity อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบ ในส่วนของความดันลด (Pressure drop; ΔP) พบว่า ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซและรัศมีความโค้งของท่อ และนอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ความเร็วต่ำและรัศมีความโค้งน้อยจะทำให้อนุภาคมีเวลาในการลอยตัวนานขึ้นและการแพร่กระจายสูง ส่งผลถึงประสิทธิภาพในการลดความชื้นของผงถ่านหิน นอกจากนี้ Hidayat *et al*. (2007) ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลที่เป็นแบบ Non-isothermal และเพิ่มตัวแปรที่พิจารณาอีก คือ solid loading ratio อุณหภูมิการป้อนก๊าซ ค่าความร้อนจากผนังท่อ โดยจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการศึกษาทดลอง จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน อุณหภูมิของก๊าซจะลดลงในขณะที่อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นตลอดแนวการเคลื่อนที่ เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซและอนุภาค ก๊าซจะมีอุณหภูมิลดลงอย่างมากที่ผนังโค้งด้านนอกในขณะที่ผิวโค้งด้านในมีอุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากที่ผิวโค้งด้านนอกมีการสะสมของอนุภาคสูง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนให้กันมากอุณหภูมิก๊าซจึงลดลง แสดงให้เห็นว่าท่อโค้งรูปตัวยูช่วยเพิ่มค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ (local Nu) และตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย (average Nu) ส่วนค่า mass average Nu จะเปลี่ยนแปลงตามค่า Slip velocity และ particle distribution

Heinl and Bohnet (2005) ทำการศึกษาการยึดเกาะผนังของอนุภาคผลึกแร่ขนาด 3 μm ที่ไหลผ่านท่อลำเลียงแบบใช้ลมซึ่งวางตัวในแนวระดับ ผู้ศึกษาใช้โปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluent) เป็นตัวประมวลผล การพิจารณาการไหลที่เป็นแบบหลายเฟสจะใช้วิธีของ Lagrage approach โดยการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจะใช้แบบจำลอง Realizable k-ε และมีการเพิ่มฟังก์ชั่นเพิ่มเติมโดยใช้ฟังก์ชั่น User Define Function (UDF) ขอบเขตของแบบจำลองที่ทำการศึกษา คือ ท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ยาว 3 เมตร ในการคำนวณมีการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชั่นผิว (ความขรุขระ) เพื่อสังเกตผลที่เกิดกับความดันในท่อ ความเร็วและการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่า ค่าความขรุขระผิวและการชนกันเองของอนุภาคมีผลต่อการเกาะตัวที่ผนังท่อ นอกจากนั้นความเร็วของอากาศและอัตราการไหลของอนุภาคยังมีผลต่อการเกาะตัวที่ผนังท่ออีกด้วย

Wang *et al*. (2006) ศึกษาการไหลแบบหลายเฟสภายในไซโคลนแบบ Lapple Cyclone โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Renolds Stress และ Stochastic Lagrange โดยทำการศึกษาปัจจัยด้าน ขนาดของอนุภาค ความเร็วของอากาศและตำแหน่งการไหลเข้าไซโคลน เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลน ประสิทธิภาพในการคัดแยกขนาดอนุภาค และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลความถูกต้อง จากการศึกษาค่าการกระจายตัว (separation efficiency) และแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค (trajectory of particle) มีความสอดคล้องกับการทดลอง โดยขนาดอนุภาค ความเร็วก๊าซและตำแหน่งการไหลข้าวของอนุภาคมีผลต่อค่าการกระจายตัวของอนุภาคภายในไซโคลน นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังเสนอว่าแบบจำลอง Renolds Stress มีความเหมาะสมกับการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในไซโคลน มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-ε

Yoshida *et al.* (2005) ใช้โปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล ศึกษาการไหลภายในไซโคลนสำหรับคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตร โดยศึกษาผลที่เกิดจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน และตำแหน่งที่มีการเพิ่มอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน ซึ่งแบ่งเป็น 3 แบบ คือ ไซโคลนแบบมาตรฐาน แบบที่มีการเพิ่มการพ่นอากาศเข้าใน ทิศตรงข้ามกับทางเข้าหลักของอากาศและแบบที่มีการเพิ่มการพ่นอากาศเข้าในทิศแนวสัมผัสกับ ผิวไซโคลน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาค สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลนจะใช้วิธีของ Runge-Kutta Gill จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนที่มีการเพิ่มอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไซโคลนแบบ

มาตรฐานที่มีการไหลเข้าทางเดียว นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วของอากาศที่จ่ายเพิ่มเข้าไซโคลนที่ตำแหน่งที่สอง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์เนื่องจากความเร็วในแนวสัมผัสสูงขึ้น เพื่อให้ประสิทธิภาพการคัดแยกสูงสุด ตำแหน่งการจ่ายของอากาศที่เพิ่มให้กับไซโคลนจะต้องอยู่ใกล้กับด้านบนของไซโคลนและทิศตรงข้ามกับทางเข้าหลักของอากาศรวมทั้งมีอัตราการไหลสูง จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกัน โดยแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมกับอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร

Mainza *et al*. (2006) ใช้โปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent 6.1 ทำการจำลองการไหลภายในไซโคลนแบบ Three product โดยมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของ Inner Vortex Finder (IVF) การศึกษาใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่น Large Eddy Simulation (LES) และ Volume of Fluid (VOF) โดยของไหลที่ศึกษาเป็นอากาศและน้ำ จากการศึกษาพบว่า การปรับระยะของ Inner Vortex Finder (IVF) มีผลต่อความเร็วในแนวสัมผัสและแนวแกนไซโคลน โดยเมื่อเพิ่มระยะของ Inner Vortex Finder (IVF) จะมีผลทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งรัศมี 110 มิลลิเมตร ความเร็วในแนวแกนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดระยะของ Inner Vortex Finder (IVF) และระยะของ Inner Vortex Finder (IVF) ยังมีผลต่อการคัดแยกอนุภาคภายในไซโคลนอีกด้วย

การศึกษาการไหลแบบหลายเฟสนี้ มีการนำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษารูปแบบการไหลในกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานภายใต้สภาวะต่างๆ กัน (Shan *et al*., 2006) โดยทำการศึกษาถึงการไหลของอนุภาคสีที่อยู่ในกระบวนการพ่นสีชิ้นงานภายใต้สภาวะที่เป็นสนามไฟฟ้า ผลของขนาดอนุภาคและคุณภาพพื้นผิว การศึกษาใช้แบบจำลองแบบสามมิติ ใช้ k- ε และ Lagrangian approach สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่มีหลายเฟส โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการคำนวณสำหรับบริเวณใกล้ผนังแบบ Non-equilibriums wall function ในส่วนของ User define function จะทำการกำหนด Drag force, gravity forceและ electrostatic field เพื่อใช้ในการคำนวณสัดส่วนโดยปริมาตรน้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคของสีที่พ่นมีขนาดประมาณ 39 ไมโครเมตร จากการศึกษาพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีการเคลื่อนที่ในแนวการไหลได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และยังใช้อัตราการไหลของของไหลต่ำ อนุภาคขนาดเล็กสามารถลอยอยู่ได้นาน ทำให้โอกาสที่จะเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวได้มาก ทำให้การเคลือบผิวชิ้นงานมีประสิทธิภาพดี อนุภาคขนาดใหญ่มีโมเมนตัมสูงทำให้การควบคุมแนวการเคลื่อนที่ยากและต้องใช้อัตราการไหลสูง นอกจากนี้

การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้ายังมีผลต่อการเกาะตัวของสีด้วย โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความต่างประจุสูงจะทำให้การเกาะตัวดีขึ้นด้วย

Zhang and Chen (2006) ได้นำโปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล มาทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศที่ใช้สำหรับการกำจัดอนุภาคของฝุ่นละอองที่ปนอยู่ในอากาศภายในห้องที่ติดตั้งระบบปรับอากาศแบบ under floor air distribution (UFAD) โดยทำการเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศแบบติดเพดานและแบบติดผนัง แบบจำลองที่นำมาใช้เป็นแบบ Eulerian one-way ซึ่งจะไม่คิดผลของแรงที่อนุภาคทำกับตัวอากาศ กำหนดให้อัตราส่วนเชิงปริมาตรน้อยมากๆ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้เป็นแบบ k-ε สำหรับอากาศ ในส่วนของอนุภาคฝุ่นละอองจะใช้แบบจำลองแบบ Discrete Random Walk (DRW) และ Stokes drag law จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยรูปแบบการไหลของอากาศเป็นส่วนสำคัญที่มีผลกับรูปแบการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นละอองภายในห้อง และระบบปรับอากาศแบบ under floor air distribution (UFAD) มีประสิทธิภาพในการกำจัดและลดการสะสมของฝุ่นละอองภายในห้องได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบปรับอากาศแบบอื่น อย่างไรก็ตามระบบ under floor air distribution (UFAD) ยังกำจัดอนุภาคของฝุ่นละอองที่เกิดบริเวณพื้นห้องได้ไม่ดี

Levy and Sayed (2007) ใช้โปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent 6.0 ศึกษาการไหลแบบเบาบางของอนุภาคที่กระทบแผ่นกั้น โดยทำการศึกษาในกรณีที่เป็นของไหลเฟสเดียว (single phase) ด้วยกระบวนการ Particle-In-Cell approach และกระบวนการ Eulerian-Eulerian approach และใช้ dynamic granular stress model นอกจากนี้ยังได้ศึกษากรณีที่เป็นของไหลสองเฟส ด้วยกระบวนการ Eulerian-Eulerian approach และใช้ dynamic granular stress model จากการศึกษาพบว่าการไหลของของไหลแบบเฟสเดียวนั้นจะมีการเกิด Shock wave ที่บริเวณด้านหน้าแผ่นกั้นที่อนุภาคชนกับแผ่นกั้น เมื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลอง ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน ในส่วนของของไหลแบบสองเฟสนั้น หากไม่คิดผลของแรงระหว่างอนุภาคแล้ว ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับกรณีแรก

Hidayat and Rasmuson (2007) ศึกษาการไหลในท่อรูปตัวยูของการลำเลียงอนุภาคภายในระบบอบแห้งที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ (non-isothermal) โดเมนของระบบเป็นแบบสภาวะคงที่และอัดตัวไม่ได้ กระบวนการคำนวณใช้แบบ Eulerian แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable k-ε และสมการการไหลใกล้ผนังเป็น Non-equilibrium wall function ในการศึกษา

จะพิจารณาปัจจัยของ ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น อัตราส่วนโดยมวล อุณหภูมิของอากาศ พลังงานความร้อนที่ให้กับผนังระบบ ความเร็วของอากาศและรัศมีความโค้งของท่อ ที่มีผลต่อรูปแบบการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและอนุภาค โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา จากผลการศึกษาค่าที่ได้จากกระบวนการทางคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยอุณหภูมิของอากาศจะลดลงในขณะเดียวกันอุณหภูมิของอนุภาคจะสูงขึ้นตามแนวการไหลในท่อ อุณหภูมิของอากาศที่บริเวณชิดขอบนอกของผิวท่อจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณด้านในโค้ง เนื่องจากอนุภาคที่บริเวณผิวนอกโค้ง มีความหนาแน่นสูง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคมาก อากาศจึงมีอุณหภูมิต่ำ

ทฤษฎีและหลักการ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ทฤษฎีด้านพลศาสตร์ของไหลสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบหลายสถานะที่เกิดขึ้นในห้องพ่นเส้นใยฝ้ายได้ ดังนั้นในบทนี้จึงจะนำเสนอพื้นฐานความรู้ของการไหล และการแก้ปัญหาด้วยกระบวนการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเกี่ยวข้องกับสมการอนุรักษ์ ทฤษฎีความปั่นป่วนและระเบียบวิธีคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method) เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัย การไหลแบบหลายสถานะที่เกิดขึ้นในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

พลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics)

ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหล การไหลที่เกิดขึ้นจะต้องสอดคล้องกับกฎพื้นฐาน 3 ข้อของกลศาสตร์ ความสัมพันธ์ของสถานะทางอุณหพลศาสตร์และสภาวะขอบเขต (White, 1999) ดังนี้

1. กฎทรงมวล (Continuity)

2. โมเมนตัมเชิงเส้นหรือกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton’s second law)

3. กฎการอนุรักษ์พลังงาน (กฎพลศาสตร์ความร้อนข้อที่หนึ่ง, Conservation of energy)

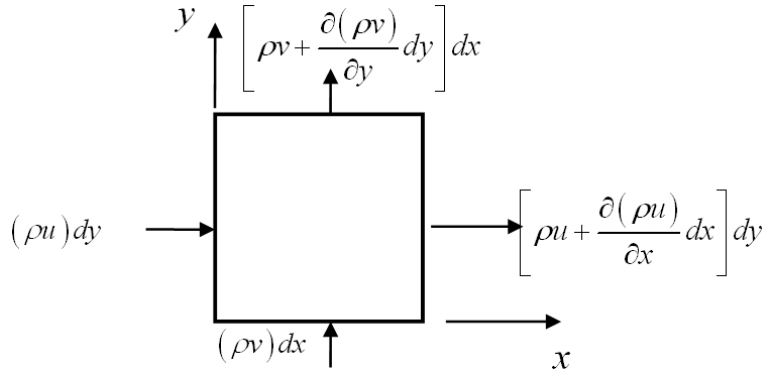
4. ความสัมพันธ์ของสถานะทางอุณหพลศาสตร์ (Equations of state)

5. เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

กฎเหล่านี้ใช้ในการพิจารณาการไหลของของไหลที่ผ่านปริมาณทางกายภาพที่คงที่ (ระบบ) ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงเอกลักษณ์ โดยทั่วไปการกำหนดขอบเขตที่แน่นอน หรือปริมาตรที่มีขนาดคงที่ขึ้นในสนามการไหล เรียกว่า “ปริมาตรควบคุม (Control Volume: C.V.)”

สมการอนุรักษ์มวล

พิจารณาของไหล เมื่อของไหลเดินทางผ่านกรอบเล็กๆ ที่มีขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 4 จากหลักความเป็นจริงที่ว่า มวลไม่สามารถสูญหายไปไหน ดังนั้นปริมาณมวลที่ไหลเข้าและออกบริเวณควบคุมนี้จะเท่ากัน นั้นคือ



ภาพที่ 4 รูปแบบของมวลที่เดินทางผ่านกรอบขนาดเล็ก

ในทิศแกน x ; $$\left[\rho u+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}dx\right]dy-[\rho u]dy=\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}dxdy \qquad (2.1)$$

ในทิศแกน y ; $$\left[\rho v+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}dy\right]dx-[\rho v]dx=\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}dxdy \qquad (2.2)$$

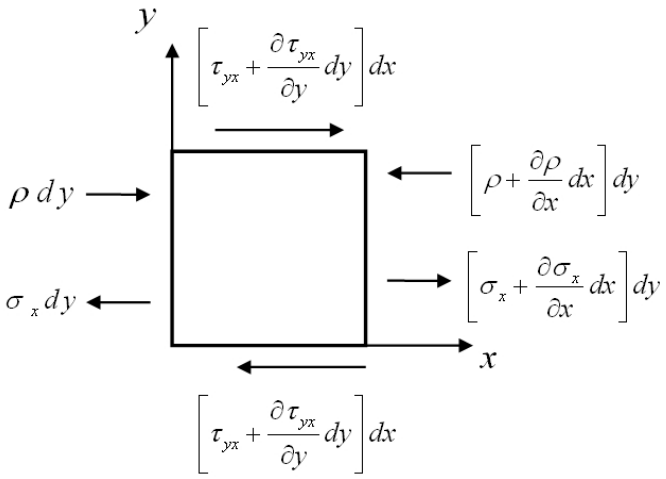
โดย u และ v เป็นความเร็วย่อยในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ซึ่งความเร็วย่อยนี้มีค่าขึ้นอยู่กับพิกัด x, y นั้นคือ $u = u(x,y,t)$ และ $v = v(x,y,t)$ และเนื่องจากปริมาณมวลในกรอบเล็กๆ เป็น $_r\, dxdy$ ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลที่ลดลงไป คือ $-\frac{\partial \rho}{\partial t} dxdy$ หมายความว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมวลจะเท่ากับปริมาณที่ลดลงภายในกรอบเล็กๆ จะได้สมการที่ (2.4) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุรักษ์มวล ซึ่งเป็นสมการอธิบายการไหลสมการแรก

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} \right] = 0 \qquad (2.3)$$

หรือ $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\left(\rho \vec{V}\right) = 0 \qquad (2.4)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

พิจารณามวลของไหลเล็กๆ ขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 รูปแบบของแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน $F = ma$ เมื่อพิจารณาแรงร่วมในทิศแกน x จะได้

$$F_x = \left[\frac{-\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right] dxdy + \rho f_x dxdy \qquad (2.5)$$

มวลของก้อนของไหลนี้คือ $m = \rho(dxdy)$ และความเร่งตามแนวแกน x คือ $a_x = \frac{Du}{Dt}$ แทนค่า m, a_x ลงในกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการที่ (2.5) จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \qquad (2.6a)$$

ทำนองเดียวกันตามแนวแกน y จะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \rho f_y \qquad (2.6b)$$

จากสมการที่ (2.6a และ 2.6b) เป็นสมการอนุพันธ์สัมบูรณ์ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาดัง เช่นสมการที่ (2.4) จะได้

ในทิศแกน x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda div(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[u\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_x \quad (2.7a)$$

ในทิศแกน y

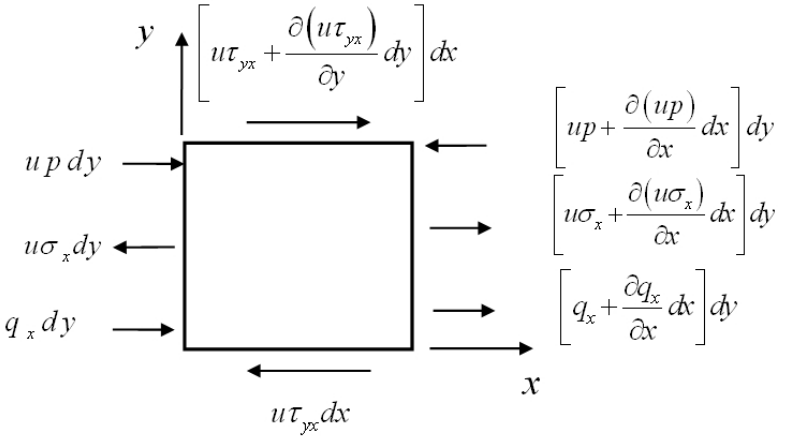
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda div(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[v\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \quad (2.7b)$$

สมการ (2.7a - 2.7b) นี้ แสดงถึงสมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัมของมวลของไหล

สมการอนุรักษ์พลังงาน

พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 6 จากหลักการอนุรักษ์พลังงานของของไหลและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิค จะได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้แก่ก้อนมวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆที่กระทำบนก้อนมวลนั้น” (ปราโมทย์, 2545) ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ได้เป็น

$$\rho\frac{D}{Dt}\left(e+\frac{V^2}{2}\right)=\rho\overline{Q}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)-\frac{\partial(up)}{\partial x}-\frac{\partial(vp)}{\partial y}+\frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x}$$
$$+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}+\frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y}+\frac{\partial(u\tau_{xy})}{\partial x}+\rho\vec{f}\bullet\vec{V} \qquad (2.8)$$



ภาพที่ 6 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy

จากสมการ (2.8) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\vec{V}\right]+div\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\vec{V}\right]=\rho\overline{Q}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)-\frac{\partial(up)}{\partial x}-\frac{\partial(vp)}{\partial y}$$
$$+\frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x}+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}+\frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y}+\frac{\partial(u\tau_{xy})}{\partial x}+\rho\vec{f}\bullet\vec{V} \qquad (2.9)$$

ความสัมพันธ์ของสถานะทางอุณหพลศาสตร์

ความสัมพันธ์ของสถานะทางอุณหพลศาสตร์เป็นสมการที่ใช้อธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงของของไหล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น หรือพลังงาน กับความดันหรืออุณหภูมิ เช่น การใช้ทฤษฎีของก๊าซสมบูรณ์เพื่ออธิบายความหนาแน่นของของไหลกับความดันและอุณหภูมิ ($\rho = RT / P$) และจากสมการอนุรักษ์ที่กล่าวข้างต้น 3 สมการ จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 5 ตัวแปร คือ ความหนาแน่น (ρ) ความเร็ว (V) ความดัน (P) พลังงานภายใน (u) และอุณหภูมิ (T) การที่จะทำการแก้ปัญหาจำเป็นจะต้องมีสมการที่เกี่ยวข้อง 5 สมการ ดังนั้น สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของสถานะทางอุณหพลศาสตร์ จะช่วยให้การแก้ปัญหาสมการอนุรักษ์นั้นสามารถทำได้

เงื่อนไขขอบเขต

ในการพิจารณาการไหลของของไหล เราจำเป็นต้องทราบเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม ซึ่งควบคุมการไหลนั้น เพื่อที่จะอธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลที่อยู่ภายในขอบเขตที่สนใจว่ามีความสัมพันธ์อย่างไร เช่น

- ความสัมพันธ์ของของไหลกับผนัง ซึ่งเงื่อนไขอบเขตจะต้องอธิบาย ได้ว่าของไหลที่จุดนั้นๆ เป็นอย่างไร เช่น ผนังและของไหลมีความเร็วเท่ากันหรือมีอุณหภูมิเท่ากัน

- ขอบเขตที่มีการไหลเข้า-ไหลออก เงื่อนไขขอบเขตจะต้องอธิบายถึงรูปแบบการกระจายตัวของความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิของของไหลที่ขอบเขตนั้นได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะเรียกลุ่มสมการที่เกิดขึ้นจากสมการอนุรักษ์ 3 สมการ (2.4, 2.7) และ (2.9) ว่าระบบสมการนาเวียร์สโตกส์ (Navier-stokes equations) ซึ่งเป็นระบบสมการตัวแทนการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นจริง โดยจะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้น การแก้สมการนาเวียร์สโตกส์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงนั้นเป็นงานที่ยุ่งยากซับซ้อน แต่เราสามารถนำเอาวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) มาช่วยในการหาคำตอบของระบบสมการนี้ได้ ซึ่งเป็นที่มาของ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ Computational Fluid Dynamics

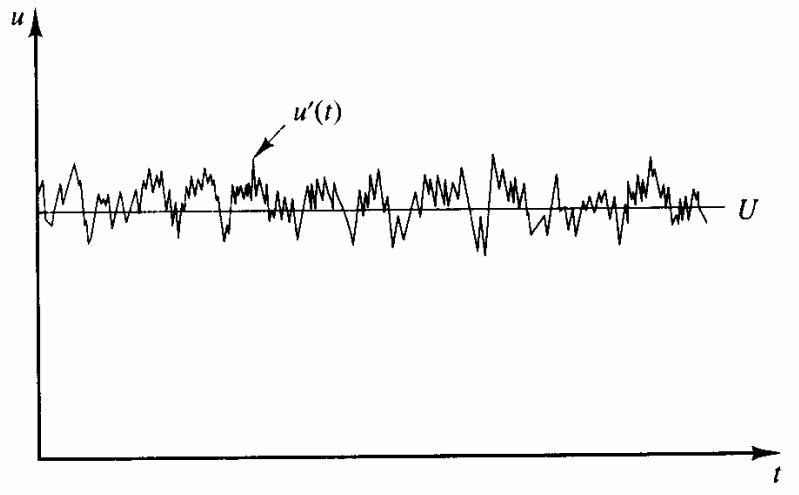
(CFD) และในลำดับต่อไปจะอธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบต่างๆ

แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

การไหลที่เลขเรย์โนลด์ (Reynolds's number, Re) สูงกว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต(Re_{crit}) สภาวะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยากและใช้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้น นักวิจัยจึงพยายามจำลองความไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อใช้กับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเหล่านั้น เราจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมและคุณสมบัติพื้นฐานของความปั่นป่วนในการไหลของของไหลและสมการค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Fox *et al*., 2003)

สมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds

ความเร็วและคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลแบบปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังภาพที่ 7 โดย $u(x, y, z, t)$ เป็นคุณสมบัติของของไหลและเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง และเวลา



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

ที่มา: Versteeg and Malalasekera (1995)

เพื่อให้ง่ายขึ้นในการแก้ปัญหาของระบบสมการนาเวียร์สโตกส์ Osborne Reynolds ได้กำหนดค่าเฉลี่ย $\bar{u}$ จาก

$$\bar{u} = \frac{1}{T} = \int_0^T u dt \tag{2.10}$$

ทั้งนี้ T เป็นช่วงเวลาเฉลี่ย ยิ่งมีช่วงกว้างยิ่งได้ค่าที่ถูกต้อง โดยมากจะกำหนดให้ มากกว่าเวลาที่แกว่งตัวของระบบ หรือกำหนดให้ $T \to \infty$ โดยกำหนดคุณสมบัติของการไหลเป็น $u_i = \overline{u_i} + u_i'$ ในรูปของเวกเตอร์เป็น $U = \overline{U} + U'$ และเมื่อนำสมการนี้ไปแทนในระบบสมการเวียร์สโตกส์ จะได้

สมการการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \overline{U}) = 0 \tag{2.11}$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมใน 3 มิติ

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + div(\rho \bar{u} \overline{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + div(\mu \, grad \bar{u}) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] + \rho f_x \tag{2.12a}$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + div(\rho \bar{v} \overline{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + div(\mu \, grad \, \bar{v}) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] + \rho f_y \tag{2.12b}$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial t} + div(\rho \bar{w} \overline{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + div(\mu \, grad \, \bar{w}) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w^2})}{\partial z} \right] + \rho f_z \tag{2.12c}$$

สมการข้างต้นนี้เรียกว่า สมการของเรย์โนลด์ หรือ Reynolds-Average Navier-Stokes equation (RANS) จะเห็นว่ารูปสมการนี้คล้ายกับสมการนาเวียสโตกส์เดิมแต่มีเทอมความเค้น (ในวงเล็บทางขวามือ) เพิ่มเข้ามา โดยสมการใน 3 มิติ จะมีทั้งหมดหกเทอมด้วยกัน เรียกความเค้นเหล่านี้ว่า Reynolds stresses

จากการทดลองและศึกษาของ Boussineq ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของเทอมความเค้นนี้ที่มีกับความเร็วเฉลี่ยของการไหลกับอัตราการเปลี่ยนรูปอิลิเมนต์ของไหล (Versteeg and Malalasekera, 1995) ไว้ดังนี้

$$Renolds\ stresses, -\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial z_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \qquad (2.13)$$

โดย μ_t คือ turbulent viscosity เป็นตัวแปรที่จำเป็นจะต้องสร้างสมการเข้ามาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสมการสามารถหาคำตอบได้ สมการเหล่านี้ คือ แบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Standard $k-\varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลองกึ่งการทดลอง โดย turbulent viscosity เป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulence kinetic energy, k) และอัตราการกระจายพลังจลน์ของความปั่นป่วน (dissipation of turbulence kinetic energy, ε) โดยมีสมการส่งถ่าย 2 ชุดเป็นสมการของ k และ ε (FLUENT User's Guide, 2001) อย่างละชุด ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+div(\rho k\overline{U})=div\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})grad\ \mathrm{k}\right]+G_k+G_b-\rho_\varepsilon-Y_M+S_k \qquad (2.14)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+div(\rho\varepsilon\overline{U})=div\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})grad\ \varepsilon\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon}G_b\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \qquad (2.15)$$

โดย G_k คือ พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย, G_b คือ พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว(Buoyancy), Y_M คือ ค่าการกดอัดได้ ซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนในการไหล $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่, σ_k และ σ_ε คือ ค่า Prandtl number ของ k และ ε ตามลำดับ แบบจำลองของค่า turbulent viscosity, μ_t คือ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.16}$$

ซึ่ง C_μ เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปค่าคงที่ในสมการถ่ายเทข้างต้นจะมีค่าเป็น

$$C_{1\varepsilon} = 1.44,\ C_{2\varepsilon} = 1.92,\ C_\mu = 0.09,\ \sigma_k = 1.0,\ \sigma_\varepsilon = 1.3$$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$

RNG $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ประดิษฐ์จากสมการนาเวียรสโตกส์ที่ใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Renormalization Group (RNG) แบบจำลองนี้จะมีค่าคงที่แตกต่างจากจากแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ และเพิ่มบางเทอมในสมการได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho k\overline{U}) = div\left[\alpha_k \mu_{eff}\, grad\ \mathrm{k}\ \right] + G_k + G_b - \rho_\varepsilon - Y_M + S_k \tag{2.17}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + div(\rho \varepsilon\overline{U}) = div\left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\, grad\ \varepsilon\ \right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k + C_{3\varepsilon}G_b\right) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \tag{2.18}$$

ค่า $G_k, G_b,$ และ Y_M มีความหมายเช่นเดียวกับสมการส่งถ่ายของแบบจำลอง Standard k–ε ขณะที่ α_k และ α_ε คือ inverse effective Prandtl numbers สำหรับ k และ ε ตามลำดับ แบบจำลองของค่า turbulent viscosity ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับแบบจำลอง RNG k–ε คือ

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72\frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} \tag{2.19}$$

โดย

$$\hat{v} = \mu_{eff} / \mu \text{ และ } C_v \approx 100$$

สมการ (2.19) จะใช้ได้ดีเมื่อการไหลนั้นมีค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ แต่ถ้าการไหลนั้นมีค่าเลขเรย์โนลด์สูงจะต้องใช้สมการ (2.17) แทนโดยกำหนดให้ค่า $C_\mu = 0.0845$ การคำนวณเพื่อหาค่า α_k และ α_ε นั้นใช้สมการ

$$\left|\frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929}\right|^{0.6321} \left|\frac{\alpha - 2.3929}{\alpha_0 - 2.3929}\right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \qquad (2.20)$$

ถ้าหากเป็นกรณีค่าเลขเรย์โนลด์สูง α_k และ $\alpha_\varepsilon \approx 1.393$ ค่า R_ε ในสมการ (2.18) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\mathrm{Re} = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \eta/\eta_0\right)}{1 + \beta\eta^3} \bullet \frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (2.21)$$

ค่าคงที่สำหรับสมการ (2.17) และ (2.18) จะมีค่าเป็น $C_{1\varepsilon} = 1.42,\ C_{2\varepsilon} = 1.68$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\varepsilon$

แบบจำลอง Realizable k–ε ถูกคิดขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัยของ Shih (FLUENT User's Guide, 2001) เป็นแบบจำลองที่แตกต่างจาก 2 แบบข้างต้น คือ การประดิษฐ์ความสัมพันธ์ eddy-viscosity สมการที่ (2.16) โดยหาค่า C_μ จากข้อเสนอของ Reynolds และสร้างสมการของ ε ด้วยสมการพลศาสตร์ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\varepsilon$ มีสมการส่งถ่าย คือ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho k\overline{U}) = div\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})grad\ \mathrm{k}\right] + G_k + G_b - \rho_\varepsilon - Y_M + S_k \qquad (2.22)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + div(\rho\varepsilon\overline{U}) = div\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})grad\ \varepsilon\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \qquad (2.23)$$

ซึ่ง

$$C_1 = \max\left[0.43\frac{\eta}{\eta+5}\right] \tag{2.24}$$

$$\eta = S\frac{k}{\varepsilon} \tag{2.25}$$

ความสัมพันธ์ที่ใช้สำหรับหา turbulent viscosity นั้นสามารถใช้สมการ (2.16) เช่นเดียวกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน แต่ในการหาค่า C_μ จะใช้ความสัมพันธ์ของ

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S\frac{kU^*}{\varepsilon}} \tag{2.26}$$

ณ ที่นี้ U^* หาได้จาก

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \overline{\Omega}_{ij}\overline{\Omega}_{ij}} \tag{2.27}$$

และ
$$\begin{aligned}\overline{\Omega_{ij}} &= \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \\ \Omega_{ij} &= \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k\end{aligned} \tag{2.28}$$

ซึ่ง $\overline{\Omega_{ij}}$ คือ mean rate-of-rotation tensor โดยค่าคงที่ $A_0 = 4.04,\ A_s = \sqrt{6}\cos\phi$ ทั้งนี้

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6W}\right) \tag{2.29}$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S} \tag{2.30}$$

$$\overline{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \tag{2.31}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{2.32}$$

ค่าคงที่ สำหรับสมการส่งถ่ายนั้นจะมีค่าดังนี้ $C_{1\varepsilon}=1.44,\ C_2=1.9, \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3$

แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Standard $k-\omega$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\omega$ เป็นแบบจำลองที่สมการส่งถ่ายนั้นได้จากการทดลอง โดย turbulent viscosity เป็นฟังก์ชั่นของอัตราส่วนพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulence kinetic energy, k) และอัตราการกระจายพลังจลน์ (dissipation of turbulence kinetic energy, ε) โดยมีสมการส่งถ่าย 2 ชุดเป็นสมการของ k และ ε (FLUENT User's Guide, 2001) อย่างละชุด ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+div(\rho k\overline{U})=div\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})grad\ \mathrm{k}\ \right]+G_k-Y_k \qquad (2.33)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}+div(\rho \omega\overline{U})=div\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega})grad\ \omega\ \right]+\frac{\alpha}{\nu_t}G_k-Y_\omega \qquad (2.34)$$

$$\mu_t=\rho\frac{k}{\varepsilon} \qquad (2.35)$$

โดยค่าคงที่ในสมการส่งถ่ายข้างต้นจะมีค่าเป็น $\sigma_k=2.0,\ \sigma_\omega=2.0, \beta=0.09,\ \beta^*=0.09$

การจำลองการไหลแบบหลายเฟส

ในการศึกษาการไหลแบบหลายเฟสที่มีอนุภาคผสมอื่นแพร่อยู่ด้วย มีคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาการไหล ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนเชิงปริมาตร(Volume fraction) อัตราส่วนเชิงมวล (mass loading) เลขสโตกส์ (Stokes number) ระยะห่างอนุภาค (particle spacing) โดยคุณสมบัติเหล่านี้ สามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราส่วนเชิงปริมาตร (Volume fraction) สามารถแบ่งได้เป็น

1. อัตราส่วนเชิงปริมาตรของของไหลอนุภาค (Dispersed phase, α_d)

คือ อัตราส่วนของปริมาตรของของไหลอนุภาค (Dispersed phase) ที่แพร่อยู่ในระบบต่อปริมาตรรวมของระบบ

$$\alpha_d = \lim_{\delta V \to \delta V^0} \frac{\delta V_d}{\delta V} \tag{2.36}$$

2. อัตราส่วนเชิงปริมาตรของของไหลหลัก (Continuous phase, α_c)

คือ อัตราส่วนของปริมาตรของของไหลหลัก (Continuous phase) ที่ไหลอยู่ในระบบต่อปริมาตรรวมของระบบ

$$\alpha_c = \lim_{\delta V \to \delta V^0} \frac{\delta V_c}{\delta V} \tag{2.37}$$

จากนิยามของอัตราส่วนเชิงปริมาตรจะได้ว่า ผลรวมของอัตราส่วนเชิงปริมาตรจะเท่ากับหนึ่ง

$$\alpha_d + \alpha_c = 1 \tag{2.38}$$

โดยอัตราส่วนเชิงปริมาตร จะอธิบายถึงสัดส่วนที่อนุภาคผสมอยู่ในการไหลหลัก และยังเป็นค่าที่บอกถึงการพิจารณาผลของอนุภาคต่อการไหลหลัก

อัตราส่วนเชิงมวล (mass loading, z)

$$z = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_c} = \frac{\bar{\rho}_d v}{\bar{\rho}_c u} \tag{2.39}$$

ระยะห่างอนุภาค (particle spacing)

คือ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของแต่ละอนุภาคที่แพร่กระจายอยู่ในปริมาตรที่สนใจ ซึ่งจะนำไปพิจารณาว่าอนุภาคเป็นอนุภาคโดดเดี่ยวหรือไม่ โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเชิงปริมาตร ได้ดังนี้

$$\frac{L}{D}=\left(\frac{\pi}{6\alpha_d}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.40}$$

เลขสโตกส์ (Stokes number)

คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Particle time constant, τ_p และ fluid time scale, τ_f โดยแสดงดังสมการ

$$St=\frac{\tau_p}{\tau_f} \tag{2.41}$$

เมื่อ

$$\tau_f=\frac{\rho_d d_d^2}{18\mu_f} \tag{2.42}$$

ซึ่งเลขสโตกส์จะบ่งบอกถึงคุณลักษณะการไหลของอนุภาคโดยหากเลขสโตกส์มีค่าน้อย แสดงว่า อนุภาคจะเคลื่อนที่ตามการไหลของของไหลหลักหรือการไหลของอนุภาคขึ้นอยู่กับการไหลของของไหลหลัก ในทางกลับกันหากเลขสโตกส์สูง อนุภาคจะมีค่าโมเมนตัมสูงและการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือทิศทางของความเร็วจะไม่มีผลต่ออนุภาค

จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถนำมาพิจารณาการไหลแบบหลายเฟสได้ โดยการทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาค จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบ Lagrangian approach ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนที่ที่เป็นไปได้ของอนุภาคทั้งหมดบน Lagrangian frame ซึ่งในการพิจารณามีสมการที่เกี่ยวข้อง คือ

สมการสำหรับทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมดุลแรงที่กระทำกับอนุภาค

$$\frac{\partial u_{ci}}{\partial t} = F_D(u_{ci} - u_{di}) + g_i(\rho_d - \rho_c)/\rho_c \tag{2.43}$$

ความเร็วของอนุภาค

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = u_{di} \tag{2.44}$$

ความสัมพันธ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

แรงฉุด (Drag force)

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_d d_d^2}\frac{C_D \,\mathrm{Re}}{24} \tag{2.45}$$

เลขเรย์โนลด์

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_c d_p \left|u_{di} - u_{ci}\right|}{\mu} \tag{2.46}$$

สัมประสิทธิ์แรงฉุด (Drag coefficient)

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}\left(1 + b_1 \,\mathrm{Re}^{b_2}\right) + \frac{b_3 \,\mathrm{Re}}{b_4 + \mathrm{Re}} \tag{2.47}$$

เมื่อ $b_1 = \exp\left(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2\right)$

$b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi$

$b_3 = \exp\left(4.905 - 13.8944\phi - 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3\right)$

$b_4 = \exp\left(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3\right)$

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD)

ความสำคัญและประโยชน์ของ CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) หรือพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ กระบวนการในการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ระบบสมการการเคลื่อนที่ของพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) การถ่ายเทความร้อน(Heat Transfer) การถ่ายเทมวล(Mass Transfer)และอื่นๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์(Computer Programming) ช่วยในการคำนวณ

ประโยชน์ของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มีหลากหลายด้าน ในด้านวิศวกรรม มีการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ช่วยในการลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ใหม่ เพราะสามารถแก้ไขปรับปรุงได้ในคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ช่วงแรกในการออกแบบ เช่น การออกแบบรูปร่างของรถยนต์ให้มีความลู่ลม (Aerodynamics) ที่สุดเพื่อลดแรงฉุด (Drag Force) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์ผ่านอากาศ ซึ่งการออกแบบโดยใช้การทดลองนั้น จะต้องมีการสร้างแบบจำลองรถยนต์ขึ้นมาจริงๆ ตามจำนวนแบบรถยนต์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ และนำไปทดสอบในอุโมงค์ลม(Wind Tunnel) เพื่อวัดค่าแรงฉุดที่กระทำกับตัวรถ ซึ่งหากมีการออกแบบไว้มาก ก็จะทำให้ต้องสร้างแบบจำลองรถยนต์มาก ส่งผลถึงการทดลองในอุโมงค์ลมก็มากขึ้นไปด้วย การนำเอาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วย จะสามารถลดเวลาและการทดลองลงได้ เพราะสามารถที่จะทำการคำนวณค่าแรงฉุดที่กระทำกับตัวรถในแบบต่างๆ ได้ในคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจึงเลือกแบบที่มีแรงฉุดน้อยที่สุดประมาณ 3 แบบมาสร้างแบบจำลองและทำการทดลองในอุโมงค์ลม จึงช่วยลดขั้นตอนต่างๆ ลง เหตุผลที่ยังต้องมีการทดสอบในอุโมงค์ลมอยู่ ก็เพราะว่าค่าที่ได้จากการคำนวณของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นค่าประมาณ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้น พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงเป็นกระบวนการที่ช่วยเสริมกระบวนการทดลอง ไม่สามารถแทนที่การทดลองทั้งหมดได้ ประโยชน์ของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนอกจากช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการออกแบบแล้ว ยังช่วยลดความเสี่ยงและความเป็นไปไม่ได้บางประการของกระบวนการทดลอง เช่น การจำลองระบบที่ใหญ่และซับซ้อน การจำลองระบบที่มีสภาวะแวดล้อมที่อันตราย การออกแบบตำแหน่งเครื่องตรวจจับควัน (Smoke Detector) หรือหัวฉีดน้ำดับเพลิง (Sprinkler)ในอาคารต่างๆ

มีปัญหาอื่นๆ อีกเป็นจำนวนมากที่พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ได้เข้ามามีบทบาทช่วยนักออกแบบ เช่น

- แรงยกและแรงฉุดของเครื่องบิน: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ถูกนำมาใช้คู่กับการทดลองในอุโมงค์ลม เพื่อหาข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์

- การไหลของอากาศผ่านจรวดนำวิถี: ต้องการหาข้อมูลของแรงยก แรงฉุด และแรงกระทำด้านข้าง โดยใช้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคู่กับการทดลองในอุโมงค์ลม แต่จะเน้นหนักไปที่การทดลอง

- เปลวไฟในการเผาไหม้: ต้องมีความเข้าใจในเรื่องผลกระทบที่มีต่อกันระหว่างการไหลของของไหลและปฏิกิริยาทางเคมี พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จะช่วยให้สามารถออกแบบหม้อเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ, เตาหลอม, และเครื่องมือที่ให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- การไหลของอากาศในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน: เมื่ออากาศถูกใช้ในการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ปริมาณอากาศที่เข้าไปในห้องเผาไหม้ต้องพอดีเพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้น วิศวกรต้องรู้ pressure drop ของทั้งระบบ และความเร็วของอากาศในห้องเผาไหม้ ซึ่งใช้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในการหาข้อมูลเหล่านี้

- การไหลของอากาศเย็นภายในอุปกรณ์อิเล็กโทรนิกส์: อุปกรณ์อิเล็กโทรนิกส์ เช่น แผงวงจรจะมีการสร้างความร้อนออกมา ความร้อนนี้จะต้องถูกกำจัดออกไปเพื่อไม่ให้อุปกรณ์ร้อนจนเกินไป โดยการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ ถ้าความร้อนถ่ายเทออกน้อยเกินไป ผู้ผลิตจำเป็นจะต้องติดพัดลมเพิ่ม เพื่อระบายความร้อนให้ได้มากขึ้น ซึ่งพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถคำนวณความร้อนที่ถ่ายเท และโปรแกรมสำเร็จรูปบางโปรแกรมทำให้สามารถเลือกขนาดพัดลมได้

- การกระจายของมลภาวะลงสู่น้ำและมหาสมุทร: มลภาวะหลายอย่างถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำและมหาสมุทร พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถใช้คำนวณว่ามลภาวะเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปที่ไหน

จากตัวอย่างขั้นต้น แสดงให้เห็นว่าการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ สามารถใช้ได้กับปัญหาหลายอย่าง และมีผู้นิยมใช้กันมาก

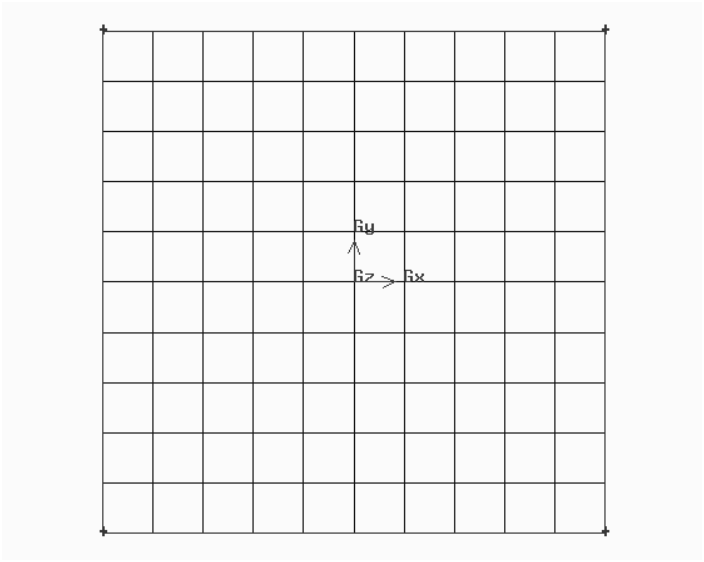
ขั้นตอนการทำ CFD

ขั้นตอนการทำ CFD นี้ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ดังนี้

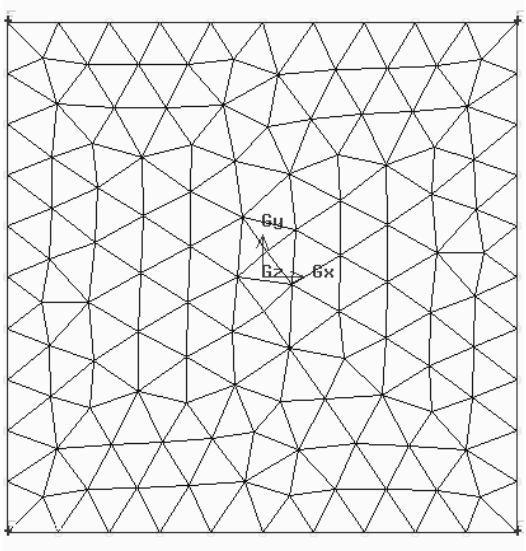
1. ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)

1.1 การสร้างขอบเขต (Domain) ส่วนใหญ่แล้วขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟท์แวร์เฉพาะทางด้าน CAD (Computer-Aided Design) เช่น AutoCAD, Pro Engineer, และ Solidwork เป็นต้น ช่วยในการสร้างขอบเขตของปัญหาที่ต้องการศึกษา

1.2 การสร้างกริด (Grid Generation) ในส่วนของขั้นตอนนี้จะทำการแบ่งชิ้นงานเป็นขอบเขตย่อยเล็ก มีรูปแบบหลายรูปแบบ เช่น สี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม เป็นต้น การกระจายตัวของกริดนี้มีด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ กริดมีโครงสร้าง (Structure Grid) และกริดไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Grid) ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9



ภาพที่ 8 กริดมีโครงสร้าง (Structure Grid)



ภาพที่ 9 กริดไม่มีโครงสร้าง (Unstructure Grid)

1.3 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้น (Define Boundary Value and Initial Value) เงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้นนี้เป็นการกำหนดรูปแบบของปัญหาที่เรากำลังศึกษาอยู่

สิ่งที่ต้องระบุโดยทั่วไปในการสร้างขอบเขต มีดังนี้

1.3.1 กำหนดความเร็ว (ที่ทางเข้าหรือที่ผนังเมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ)

1.3.2 สร้างโครงสร้างความเร็ว (ที่ผนังเมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน)

1.3.3 กำหนดพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน

1.3.4 กำหนดความดัน (Pressure) ที่ทางออก

1.3.5 ระบุคู่ของขอบเขตที่เป็นวงกลม เมื่อตัวแปรการไหลเหมือนกันทุกจุดที่ตรงกันบนขอบเขตทั้งสอง

ถ้าต้องการแก้ปัญหาที่เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady state) ต้องระบุขอบเขตอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าต้องการแก้ปัญหาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Unsteady state) ต้องระบุเงื่อนไขเริ่มต้นด้วย มีค่าของตัวแปรการไหลที่จุดเริ่มต้นของการคำนวณ และตัวแปรเหล่านี้ต้องระบุที่ทุกจุดของอาณาเขตการไหล หลายครั้งที่มีบางค่าไม่ทราบค่าอย่างแน่นอน ดังนั้นต้องทำการสมมติขึ้นมา ถึงแม้ว่าปัญหาจะแก้ไขโดยวิธีที่เป็นการไหลแบบคงตัว บางครั้งก็ระบุเงื่อนไขเริ่มต้นด้วย โดยโปรแกรมสำเร็จรูปหลายโปรแกรมจะสมมติค่าเริ่มต้นของตัวแปรการไหลให้

2. ขั้นตอนประมวลผล (Processing)

2.1 จัดรูปสมการให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ในขั้นนี้ คือ การจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลและความร้อนให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมกับปัญหาที่เราต้องการศึกษา

2.2 การทำให้สมการไม่ต่อเนื่อง (Discreastisation) การทำให้สมการไม่ต่อเนื่องนี้ คือ การแปลงสมการที่มีรูปแบบต่อเนื่องที่อยู่ในรูปพีชคณิต (Algebraic Equation) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อให้เหมาะสมในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ วิธีที่นิยมใช้สำหรับการแก้ปัญหานี้ คือ วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) เนื่องจากวิธีนี้มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) สำหรับวิธีไฟไนต์วอลุ่มนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์ (Conservation Law) จึงทำให้เหมาะสมกับการแก้ปัญหาทางด้านความร้อนและของไหล

2.3 วิธีการหาผลเฉลย (Solution) ในส่วนนี้ระบบสมการที่ถูกจัดรูปโดยวิธีไฟไนต์วอลุ่มนั้นจะถูกแก้ระบบสมการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมในการแก้ระบบสมการพีชคณิตใน CFD คือ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำ (Iterative Method)

3. ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing)

ขั้นตอนหลังการประมวลผลนี้ จะทำการนำข้อมูลดิบที่ได้จากการคำนวณ มาแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ตามงานที่ต้องการนำไปใช้ ได้แก่ รูปกราฟ (Graph), แถบสี (Contour) และเวกเตอร์ (Vector) เป็นต้น

วิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering)

ณรงค์ และ ประสิทธิ์ (2550) ได้ให้ความหมายของวิศวกรรมย้อนรอย ว่าวิศวกรรมย้อนรอย หมายถึง การศึกษาผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการปลายทางที่สนใจด้วยการประยุกต์องค์ความรู้และศาสตร์ในสาขาต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ กระบวนการทั้งหมดของการผลิตหรือกระบวนการที่เกี่ยวเนื่องที่ทำให้เกิดกระบวนการที่ปลายทางนั้น(Know How & Know Why) ซึ่งสามารถนำไปใช้ลอกเลียนแบบ(Duplicate) ปรับปรุง(Develop) หรือสร้างสรรค์(Creative) ให้กระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ที่สนใจนั้นเกิดเป็นกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยไม่ล่วงละเมิดสิทธิของเจ้าของเดิม

กระบวนการสร้างแบบจำลองด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ประการ คือ

1. ชิ้นงานต้นแบบที่ต้องการสร้างแบบจำลอง
2. สแกนเนอร์ 3 มิติ
3. โปรแกรมในการปรับแต่งแบบจำลอง

โดยหลักการทำงานของวิศวกรรมย้อนรอยนั้น สแกนเนอร์จะทำการจับตำแหน่งพิกัดบนพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบด้วยการสัมผัส หรืออาศัยการสะท้อนกลับของแหล่งกำเนิดแสงที่ฉายไปยังพื้นผิวของวัตถุต้นแบบ กลับมายังอุปกรณ์รับสัญญาณตำแหน่งของลำแสง สัญญาณที่ได้จากสแกนเนอร์จะถูกโปรแกรมวัดตำแหน่งพิกัด (Digitizing Software) แปลงผลให้กลายเป็นพิกัดของจุดในระบบ 3 มิติ หลังจากนั้นจุดพิกัดต่างๆ ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการปรับเปลี่ยนจุดพิกัดไปเป็นพื้นผิวของแบบจำลอง

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิศวกรรมย้อนรอย

โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวัดลอกแบบนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

การวัดแบบสัมผัสกับชิ้นงาน (Contact Measurement) เช่น ดิจิไทเซอร์ (Digitizer), เครื่องมือวัดแบบ 3 แกน (Coordinate Measuring Machine:CMM), เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์, เวอร์เนียไฮเกจ, ไมโครมิเตอร์ และนาฬิกาวัดลึก (Dial Gauge) เป็นต้น ข้อเสียของการวัดแบบสัมผัสกับชิ้นงานประการหนึ่งก็คือ ถ้าชิ้นงานมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่อ่อนนุ่ม แรงกดจากหัววัดแบบสัมผัสจะทำให้ขนาดที่วัดได้คลาดเคลื่อนไป และวัดได้ยากสำหรับผิวโค้ง

การวัดแบบไม่สัมผัสกับชิ้นงาน (Non Contact Measurement) เช่น เครื่องมือวัดแบบระบบเลเซอร์ (Laser Scanning and Digitizing Systems) และเครื่องมือวัดแบบระบบออปติก (Optical Scanning and Digitizing Systems) เป็นต้น จะมีความเหมาะสมกับประเภทของชิ้นงานแบบซับซ้อนได้ดีกว่า โดยทั่วไปจะได้รับความนิยมในการนำมาใช้วัดลอกแบบเพื่อสร้างโมเดลในคอมพิวเตอร์มากกว่า

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิศวกรรมย้อนรอยในปัจจุบัน เป็นเครื่องมือที่ทำงานในลักษณะการหากลุ่มจุดบนผิวชิ้นงาน ซึ่งเทคโนโลยีที่ผู้ผลิตเครื่องจักรหลายรายได้ใช้ มีอยู่หลายวิธี ได้แก่

ระบบพื้นฐานที่เป็นเครื่องจักรกล

เครื่องมือที่มีระบบพื้นฐานแบบเครื่องจักรทั่วไป ระบบจะยึดหลักการสแกนตามมือที่นำมาลากไป หรืออาจจะมีการเคลื่อนไหวโดยอัตโนมัติตามลักษณะเครื่อง โดยรอบวัตถุที่ต้องการสแกนโดย Electro-Optical หรือ Electromagnetic Sensors จะป้อนตำแหน่งเข้าสู่ระบบ Data Acquisition ของซอฟแวร์

ระบบพื้นฐานแบบกล้องถ่ายรูป

โดยมากเป็น Light-Based ซึ่งทำงานโดยหลักการ Illuminating Point ขึ้นอยู่กับแต่ละระบบ โดยบางระบบก็ใช้แสงเลเซอร์ อินฟราเรด หรือ อุลตราไวโอเล็ต และโดยทั่วไป CCD Sensors จะนำมาจับการสะท้อนของแสง

ซอฟแวร์ที่ถูกนำมาใช้ควบคุม Pattern ของความสว่าง การไหลของ Triangulation ใช้หลักการตกกระทบ และความแตกต่างของความยาวคลื่นแสงเป็นข้อมูล เพื่อค้นหาตำแหน่งที่พิกัด ข้อมูลที่ต้องการ คือ Cloud Point หรือ Polygonal Data ซึ่งถูกรับและส่งเข้าระบบ Post Processing ซอฟแวร์แปลงเข้าไปใน CAD ในรูปแบบที่สามารถใช้งาน ได้

HYBRID, HANDHELD และอื่นๆ

ความคล้ายคลึงและการวิเคราะห์มิติ

ในการศึกษาที่มีการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและต้นแบบ ระบบทั้งสองจะต้องมีความคล้ายคลึงกันจึงจะสามารถนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกันได้ และให้ผลที่มีความถูกต้อง ความคล้ายคลึงของระบบ สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต คือ ความคล้ายคลึงทางรูปร่างของระบบ โดยที่แบบจำลองและต้นแบบ จะต้องมีขนาดของอัตราส่วนความยาวเชิงเส้นและอัตราส่วนของมุม เหมือนกันในระบบสามมิติ ซึ่งจะทำให้จุดทุกจุดบนแบบจำลองมีมุมและตำแหน่งสอดคล้องกัน (Homologous) กับต้นแบบ

ความคล้ายคลึงทางจลนศาสตร์ คือ การที่แบบจำลองและต้นแบบ มีอัตราส่วนความยาวเท่ากัน (ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต) และอัตราส่วนเวลาเท่ากัน ดังนั้น อัตราส่วนความเร็วที่ตำแหน่งที่สอดคล้องกันของแบบจำลองและต้นแบบจะเท่ากันและมีทิศทางเดียวกัน

ความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ คือ การที่แบบจำลองและต้นแบบมีอัตราส่วนของแรงที่กระทำที่จุดต่างๆ ที่สอดคล้องกันของแบบจำลองและต้นแบบเท่ากันและมีทิศทางเดียวกัน ซึ่งก็หมายความว่าอัตราส่วนความยาวต้องเท่ากัน (ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต) และอัตราส่วนเวลาต้องเท่ากัน (ความคล้ายคลึงทางจลนศาสตร์)

การวิเคราะห์มิติ คือ การจัดกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ให้อยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย เพื่อให้สามารถพิจารณาความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์ของแบบจำลองและต้นแบบได้ โดยเมื่อกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยระหว่างแบบจำลองและต้นแบบมีค่าเท่ากันทุกกลุ่ม ก็จะทำให้เกิดความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

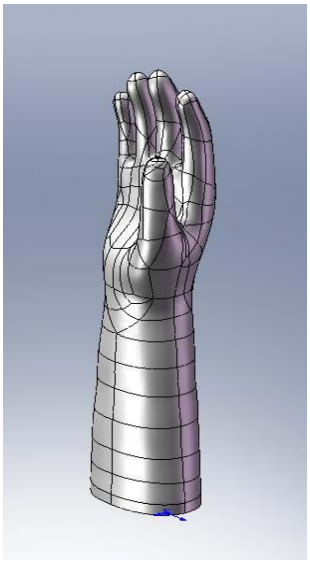
อุปกรณ์

1. เครื่องวิศวกรรมย้อนรอย
2. ชุดแม่พิมพ์ถุงมือขนาด 1:2 สร้างจากปูนพลาสเตอร์ทาสีดำ
3. แผงรังผึ้งสร้างจากท่อพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. ยาว 200 mm.
4. ห้องพ่นเส้นใยฝ้ายขนาด 1:2 สร้างด้วยแผ่นพลาสติกใส (Perspex) ความหนา 8 mm.
5. พัดลมแบบตามแนวแกน (Axial fan) แบบ 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 2 แรงม้า
6. อุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)
7. ชุดพ่นเส้นใยฝ้ายสร้างด้วยแผ่นพลาสติกใส (Perspex) มีมอเตอร์กวนด้านล่างของเส้นใย
8. ปั๊มลมขนาด 3 แรงม้าสำหรับจ่ายลมให้ชุดพ่นเส้นใยฝ้าย
9. กล้องวิดีโอแบบ CCD
10. เครื่องวิเคราะห์ภาพและโปรแกรมวิเคราะห์
11. เครื่องคอมพิวเตอร์
12. หลอดฟลูออเรสเซ็นต์
13. โปรแกรม Fluent และ Gambit สำหรับการสร้างโดเมนของห้องพ่นเส้นใยฝ้ายและวิเคราะห์การไหลภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย
14. เส้นใยฝ้าย
15. Micro manometer และ Pitot tube
16. ตาชั่งดิจิตอล
17. กระดาษสีดำด้านสำหรับเป็นฉากในการบันทึกภาพ

เนื่องจากขนาดระบบของกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายที่มีอยู่ในปัจจุบัน มีขนาดใหญ่และมีการทำงานตลอดเวลา ทำให้การศึกษาและทดลองหลายอย่างไม่สะดวก จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองและลดขนาดของระบบเพื่อให้สะดวกในการศึกษา โดยในการลดขนาดของระบบนี้จะอาศัยทฤษฎีของความคล้ายคลึงและการวิเคราะห์มิติเข้ามาช่วย ทำให้ได้อุปกรณ์ ดังนี้

ชุดแม่พิมพ์ถุงมือที่นำมาทำการศึกษา ได้จากการทำวิศวกรรมย้อนรอยแม่พิมพ์ถุงมือขนาดเบอร์ 8 ดังแสดงในภาพที่ 10 แล้วนำแบบจำลองสามมิติทางคอมพิวเตอร์ของแม่พิมพ์ถุงมือ ดังแสดงในภาพที่ 11 มาสร้างแบบจำลองต้นแบบขนาด 1:2 ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบรวดเร็ว (Rapid prototype) เพื่อใช้สร้างแบบหล่อปูนพลาสเตอร์ และเมื่อนำแบบหล่อปูนพลาสเตอร์มาประกอบเป็นแบบจำลองของชุดแม่พิมพ์ถุงมือจะได้ชุดแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 12

ภาพที่ 10 แม่พิมพ์ของถุงมือเบอร์ 8

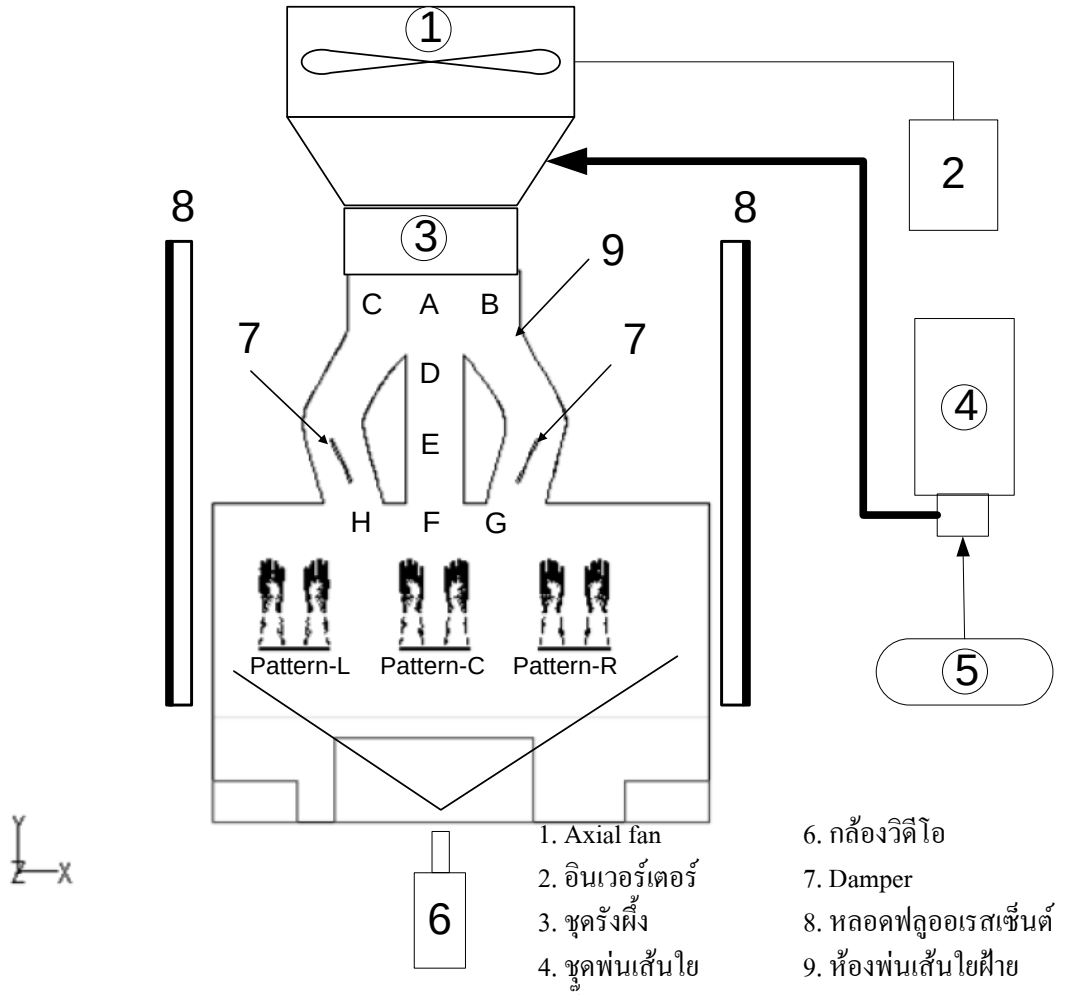


ภาพที่ 11 แบบจำลองสามมิติทางคอมพิวเตอร์ของแม่พิมพ์ถุงมือเบอร์ 8

ภาพที่ 12 ชุดแม่พิมพ์ถุงมือ (Glove pattern)

ห้องพ่นเส้นใยฝ้ายจำลองดังแสดงในภาพที่ 13 สร้างจากแผ่นพลาสติกใส(Perspex) หนา 8 mm. มีช่อง flow inlet กว้าง 368.6 mm. ยาว 817.5 mm. (Hydraulic diameter = 0.5081 m.) บริเวณช่องการไหลด้านข้างซ้าย-ขวา ติดตั้งแผ่นปรับรูปแบบการไหล(Damper) ที่กึ่งกลางห้องมีรางสำหรับวางชุดแม่พิมพ์ถุงมือขนาดเบอร์ 8 ที่สร้างจากปูนพลาสเตอร์จำนวน 3 ชุดทาสีดำ เพื่อให้สามารถสังเกตการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายได้ชัดเจน ห้องพ่นเส้นใยมีช่องทางออกของอากาศ 6 ช่อง ประกอบด้วย Return 2 ช่อง และ Exhausts 4 ช่อง ที่ตำแหน่ง flow inlet ทำการติดตั้งแผงรังผึ้งเพื่อจัดระเบียบการไหลของอากาศจากพัดลมแบบตามแนวแกน โดยแผงรังผึ้งมีขนาดของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 10 เท่าเพื่อให้อากาศที่ไหลผ่าน เกิดเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่แล้ว (Hydrodynamically developed flow) อากาศที่ถูกเป่าเข้าไปในห้องพ่นเส้นใยโดยผ่านแผงรังผึ้งจะถูกควบคุมความเร็วของอากาศโดยใช้อุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์

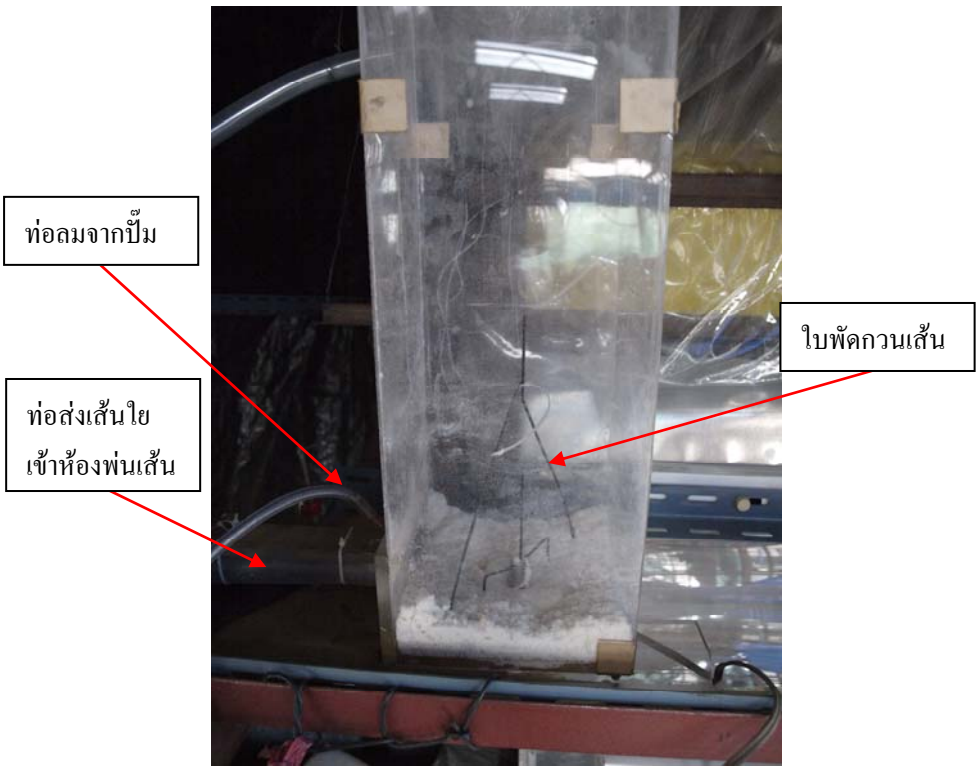
ชุดพ่นเส้นใยฝ้ายดังแสดงภาพที่ 14 สร้างจากแผ่นพลาสติกใสขนาดกว้าง 150 mm. ยาว 150 mm. และสูง 300 mm. ภายในมีใบพัดติดมอเตอร์เพื่อกวนเส้นใยป้องกันการอัดตัวของเส้นใย ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถพ่นเส้นใยไปยังห้องพ่นเส้นใยได้ ชุดพ่นเส้นใยฝ้ายจะอาศัยลมจากปั๊มลมขนาด 3 แรงม้า เป็นตัวพาเส้นใยไปยังห้องพ่นเส้นใย โดยชุดพ่นเส้นใยฝ้ายสามารถพ่นเส้นใยด้วยอัตราการไหลโดยมวล 0.01-0.017 kg/s เส้นใยฝ้ายที่นำมาใช้ เป็นเส้นใยที่สับละเอียด ขนาดความยาวประมาณ 0.3-5.0 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.7-22 dtex ความหนาแน่นประมาณ 1648.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 15



1. Axial fan
2. อินเวอร์เตอร์
3. ชุดรังผึ้ง
4. ชุดพ่นเส้นใย
5. ปั๊มลม
6. กล้องวิดีโอ
7. Damper
8. หลอดฟลูออเรสเซ็นต์
9. ห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

A-H ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลความเร็วและความดัน

ภาพที่ 13 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง



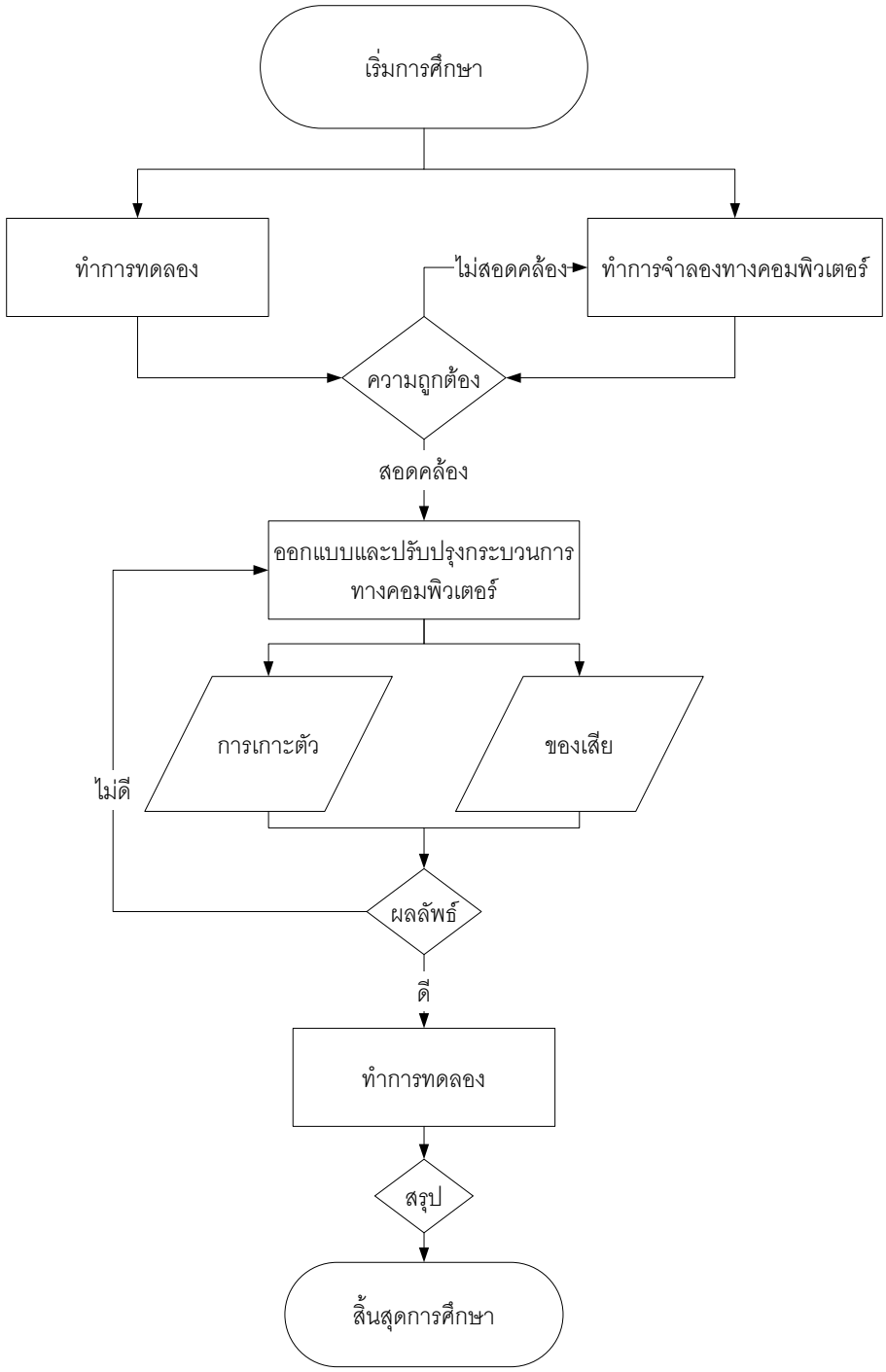
ภาพที่ 14 ชุดพ่นเส้นใยฝ้าย (Flock feeder)

ภาพที่ 15 เส้นใยฝ้าย (Flock)

ห้องพ่นเส้นใยฝ้ายจะติดตั้งอยู่ในห้องที่จำกัดแสงจากภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 16 มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฟลูออเรสเซ็นต์ขนาด 36 watt จำนวน 8 หลอด เป็นตัวให้แสงสว่าง และภาพการเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายภายในห้องพ่นเส้นใยจะถูกบันทึกด้วยกล้องวิดีโอ Panasonic รุ่น SDR-H20 ตัวรับภาพ 1/6” CCD โดยกล้องวิดีโอติดตั้งไว้ตั้งฉากกับห้องพ่นเส้นใยฝ้าย เพื่อบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเส้นใยภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย นอกจากนี้ยังต้องทำการบันทึกภาพการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายบนพื้นผิวของแม่พิมพ์ถุงมือหลังจากทำการพ่นเส้นใยอีกด้วย โดยจะทำการบันทึกภาพที่มุมตั้งฉากด้านบนของชุดแม่พิมพ์ถุงมือและบันทึกภาพที่มุมตั้งฉากด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ถุงมือ ซึ่งในการบันทึกภาพวิดีโอนั้น บริเวณที่ทำการบันทึกภาพจำเป็นต้องถูกจำกัดแสงจากภายนอก เพื่อให้ได้ภาพที่มีแหล่งกำเนิดแสงแหล่งเดียวกัน โดยให้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซ็นต์เท่านั้น ทำการวัดค่าความเร็วในแนวแกนตั้ง (Y-axis) และความดันสถิตของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (A-H) ด้วย micro manometer DP-CALC รุ่น 5815 และภาพที่บันทึกจะได้นำมาวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม ด้าน Image analyzer เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การกระจายตัวและการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายต่อพื้นที่ผิวของแม่พิมพ์ถุงมือยาง

ภาพที่ 16 แบบจำลองห้องพ่นเส้นใยฝ้ายที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องจำกัดแสง

วิธีการ



ภาพที่ 17 แผนผังวิธีการวิจัย

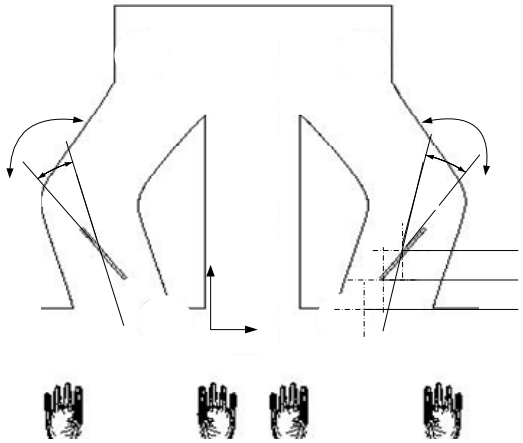
จากภาพที่ 17 แสดงกระบวนการและวิธีวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มหลักๆ ได้ 3 ส่วน คือ การประเมินความถูกต้องของโปรแกรมที่เลือกมาใช้ การออกแบบปรับปรุงกระบวนการในการพ่นเส้นใยฝ้ายและส่วนสุดท้ายเป็นการประเมินผลจากการปรับปรุงกระบวนการแล้ว โดยในแต่ละขั้นตอนสามารถแยกอธิบายได้ ดังนี้

การประเมินความถูกต้องของโปรแกรม

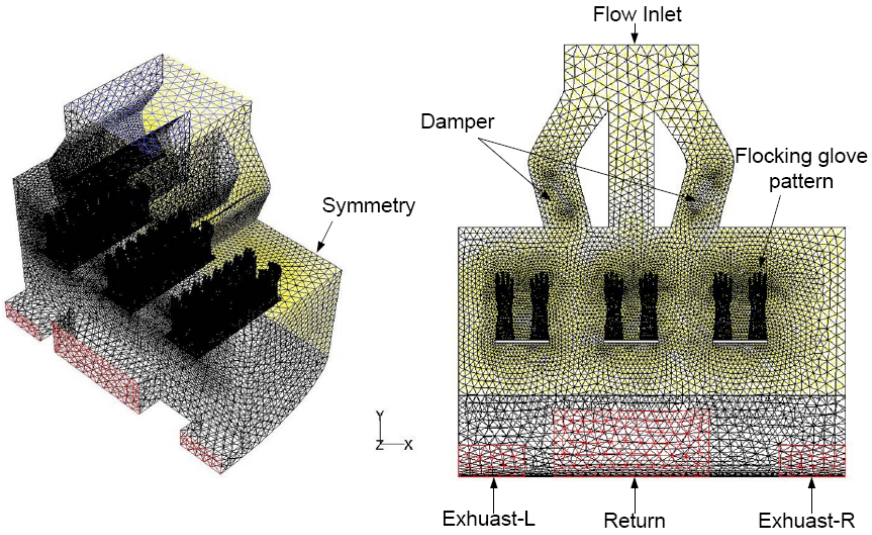
ในส่วนนี้จะแบ่งการวิจัยเป็น 2 ส่วน คือ

1. การศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของห้องพ่นเส้นใยฝ้ายแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแบบทางคอมพิวเตอร์ ขนาด 1:2 โดยอาศัยข้อมูลแม่พิมพ์ถุงมือยางที่ได้จากการทำวิศวกรรมย้อนรอย รูปแบบการติดตั้งและการปรับองศาของแผ่นปรับรูปแบบการไหล(Damper) โดยทำการติดตั้ง Damper ที่ตำแหน่งบนสุด (Top) และทำมุม-20 องศากับทิศทางการไหล (เรียกแบบจำลองสามมิติของห้องพ่นเส้นใยนี้ว่า แบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T) อธิบายได้ดังภาพที่ 18 หลังจากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ มาทำการสร้างเป็นแบบจำลองโครงสร้าง ตาข่ายแบบสามมิติของห้องพ่นเส้นใยฝ้ายโดยใช้โปรแกรม Gambit รูปแบบการแบ่งโดเมนเป็นแบบ unstructured tetrahedral ได้จำนวนชิ้นส่วนประกอบ 3,538,710 ชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 19 ในการศึกษาทางคอมพิวเตอร์จะพิจารณาห้องพ่นเส้นใยเพียงครึ่งส่วน โดยถือว่าการไหลในห้องพ่นเส้นใยมีความสมมาตร เพื่อลดความต้องการทรัพยากรของคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 18 ตำแหน่งและรูปแบบการปรับมุมองศาของแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper)



ภาพที่ 19 แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสามมิติและขอบเขตของห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

หลังจากได้แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแล้ว ทำการกำหนดรูปแบบเงื่อนไขขอบเขตให้กับโดเมนที่จะทำการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 19 เพื่อนำไปทำการคำนวณต่อในโปรแกรม Fluent โดยในขั้นตอนการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Fluent จะใช้แบบจำลองการไหลที่เรียกว่า Discrete phase model ซึ่งจะพิจารณาบนระบบที่เรียกว่า Lagrangian method โดยมีข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

- เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและมีอนุภาคอื่นผสมอยู่ในอัตราส่วนเชิงปริมาตรน้อยกว่า 10เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด (แสดงการคำนวณในภาคผนวก) โดยการไหลที่เกิดขึ้นเป็นแบบสภาวะคงที่

- แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศจะใช้ระบบสมการนาเวียร์สโตกส์ (Navier-stokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\varepsilon$ โดยกำหนดให้อากาศเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

- แบบจำลองการไหลของอนุภาคเส้นใยจะใช้แบบจำลองแบบ Stochastic tracking with Discrete Random Walk (DRW)

- เส้นใยขนาด 50 μm จะถูกฉีดเข้าไปยังห้องพ่นเส้นใยด้วยอัตราการไหลโดยมวล 0.005 kg/s ในลักษณะของกลุ่มการพ่น (Group injection) ที่มีจุดศูนย์กลางที่กึ่งกลางห้องพ่นเส้นใย

- อนุภาคเส้นใยแต่ละอนุภาคไม่มีแรงกระทำต่อกัน และการเคลื่อนที่เกิดจากแรงอื่นๆ ที่กระทำบนอนุภาคเส้นใย

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน สำหรับพิจารณาการไหลของของไหลหลักหรืออากาศก่อน แล้วจึงนำผลการคำนวณที่ได้ไปใช้ในการพิจารณาการไหลของของไหลรองหรือเส้นใยฝ้าย โดยรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะเงื่อนไขขอบเขต

Boundary	Continuous phase	Discrete phase
Inlet flow	Velocity inlet with UDF	Velocity inlet with UDF 50 μm size and 0.005 kg/s of flock injection
Return and exhausts	Pressure outlet 0 Pa	Pressure outlet 0 Pa and set escape for the zone
Symmetry plane	Symmetry	Symmetry
Glove pattern	wall	Wall and set trap for the zone
Other	Wall	Wall and set reflect for the zone

2. การทดลองเพื่อทดสอบผลที่ได้จากการศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ในส่วนของการทดลองนั้น จะทำการจำลองการไหลในห้องพ่นเส้นใยฝ้ายจำลองที่สร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 13 โดยกำหนดให้ความเร็วที่ทางเข้าของชุดทดลอง (Inlet flow) มีความเร็วเฉลี่ย 4.5 m/s ซึ่งควบคุมความเร็วของพัดลมแบบตามแนวแกนโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ทำการเก็บค่าของความเร็วในแนวแกน Y และความดันในตำแหน่งต่างๆ ที่กำหนดไว้ (A-H) โดยใช้ Micro manometer และ Pitot tube ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 20

ภาพที่ 20 ตัวอย่างการวัดค่าความเร็วในแนวแกน Y และความดัน ภายในของห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

จากนั้นทำการจำลองการไหลในกรณีที่มีการพ่นเส้นใยฝ้าย โดยกำหนดให้ชุดพ่นเส้นใยฝ้ายพ่นเส้นใยขนาด 50 μm ด้วยอัตราการไหลโดยมวล 0.01 kg/s (สองเท่าของการจำลองทางคอมพิวเตอร์เนื่องจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์พิจารณาห้องพ่นเส้นใยฝ้าย เพียงครึ่งเดียว) เป็นเวลา 10 วินาที (ระยะเวลาที่ชุดแม่พิมพ์ถุงมือยางอยู่ภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย) ทำการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเส้นใยโดยใช้กล้องวิดีโอ ซึ่งติดตั้งไว้ด้านหน้าของห้องพ่นเส้นใยฝ้าย หลังจากนั้นนำแบบจำลองแม่พิมพ์ถุงมือยางมาทำการบันทึกภาพการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายบนแบบจำลองแม่พิมพ์ถุงมือยาง โดยบันทึกภาพด้านบนและภาพด้านข้างของแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังทำการเก็บค่าน้ำหนักของเส้นใยที่ไหลผ่านช่องของเสีย (exhausts) ทั้ง 4 ช่อง และช่องการนำกลับมาใช้ใหม่ (return) 2 ช่อง

ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยแบ่งเป็นการเปรียบเทียบความเร็ว ความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (A-H) และรูปแบบการเคลื่อนที่ของเส้นใยภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย ในส่วนของการวิเคราะห์ภาพจะใช้โปรแกรมด้าน Image analyzer เพื่อวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การกระจายตัวและการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายบนพื้นที่ผิวทั้งหมดของแม่พิมพ์ถุงมือยางในมุมมองด้านบน (Top view) และมุมมองด้านข้าง (Side view) และเปรียบเทียบอัตราการไหลโดยมวลของเส้นใยที่ผ่านช่องของเสีย (exhausts) และช่องการนำกลับมาใช้ใหม่ (return)

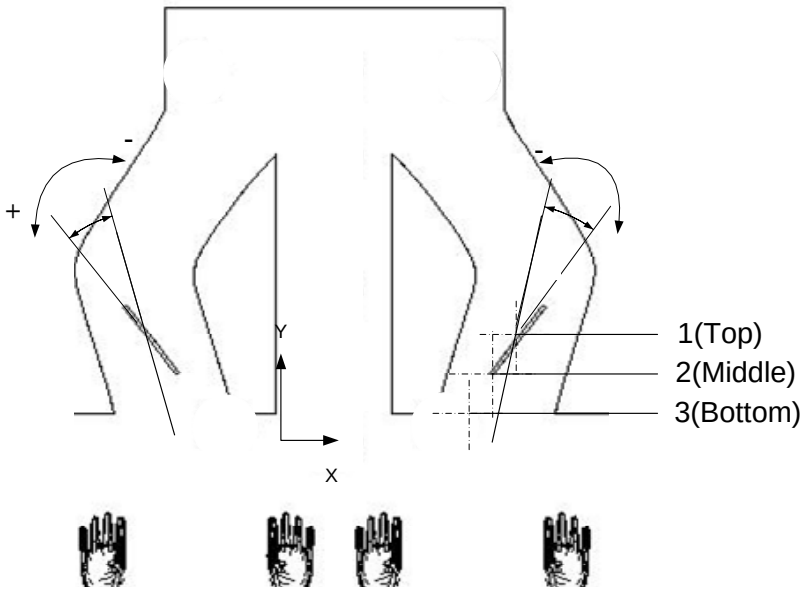
การออกแบบปรับปรุงกระบวนการในการพ่นเส้นใยฝ้าย

หลังจากทำการประเมินความถูกต้องของโปรแกรม ทำการออกแบบปรับปรุงรูปแบบการไหลภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย โดยศึกษาถึงการปรับเปลี่ยนมุมของแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper) และตำแหน่งในการติดตั้ง จะได้แบบจำลองการพ่นเส้นใยที่นำมาศึกษา ซึ่งอธิบายได้ดังแสดงในตารางที่ 3 ภาพที่ 21และภาพที่ 22

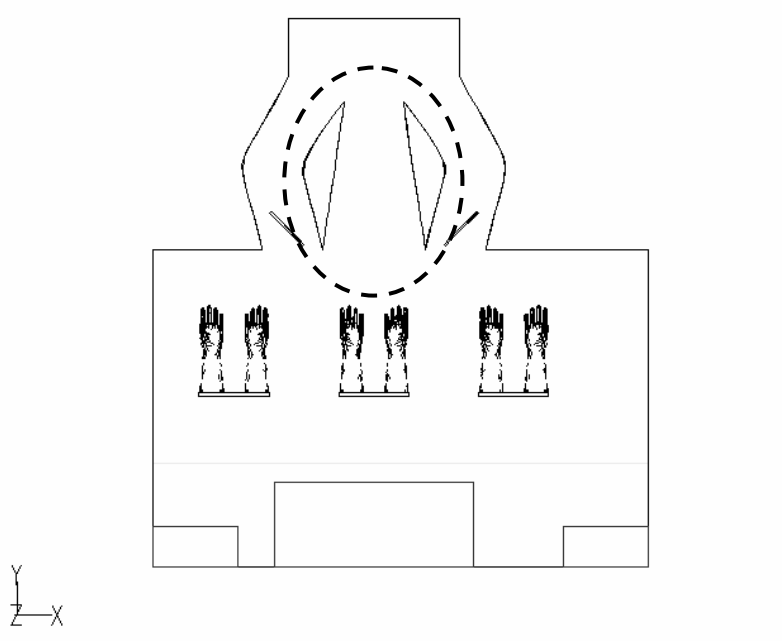
ตารางที่ 3 ตำแหน่งและมุมองศาของแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper)

แบบจำลองการพ่นเส้นใย	**แผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper)**		**รายละเอียดเพิ่มเติม**
	ตำแหน่งการติดตั้ง	**มุมเอียง, θ**	
S30T	Top	30	-
S30M	Middle	30	-
S30B	Bottom	30	-
S20T	Top	20	แบบจำลองของระบบที่ใช้ในปัจจุบัน
S20M	Middle	20	-
S20B	Bottom	20	-
S10T	Top	10	-
S10M	Middle	10	-
S10B	Bottom	10	-
SM40B	Bottom	-40	-
SM30B	Bottom	-30	-
SM20B	Bottom	-20	-
SM2	Bottom	30	เปลี่ยนรูปแบบช่องการไหลกลาง

หมายเหตุ: มุมเอียง (θ) อธิบายได้ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ตำแหน่งและรูปแบบการปรับมุมองศาของแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper)



ภาพที่ 22 แสดงการเปลี่ยนรูปแบบช่องการไหลกลางของแบบจำลอง SM2

จากแบบจำลองแบบต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบ ทำการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้ายแต่ละแบบโดยใช้ข้อกำหนดเดียวกันกับการศึกษาในส่วนของการประเมินความถูกต้องของโปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะพิจารณาถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของเส้นใยภายในห้องพ่นเส้นใย เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การกระจายตัวและการเกาะตัวของเส้นใยบนแบบแม่พิมพ์ถุงมือยางและเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

การประเมินผลจากการปรับปรุงกระบวนการ

หลังจากวิเคราะห์ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แล้ว นำแบบจำลองการพ่นเส้นใยที่มีการเกาะตัวดีที่สุดมาทำการทดลองเปรียบเทียบกับผลกับการจำลอง โดยใช้ข้อกำหนดเดียวกันกับการศึกษาในส่วนของการประเมินความถูกต้องของโปรแกรม ที่กล่าวมาข้างต้น ทำการวิเคราะห์รูปแบบการเคลื่อนที่ของเส้นใยภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การกระจายตัวและการเกาะตัวของเส้นใยบนพื้นที่ทั้งหมดของแบบแม่พิมพ์ถุงมือยางในมุมมองด้านบนและมุมมองด้านข้าง และอัตราการไหลโดยมวลของเส้นใยที่ผ่านช่องของเสีย (exhausts) และช่องการนำกลับมาใช้ใหม่ (return) แล้วทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองการพ่นเส้นใยที่มีการเกาะตัวดีที่สุดกับแบบจำลองการพ่นเส้นใย S20T ซึ่งเป็นสภาวะการใช้งานที่ใช้จริงในกระบวนการผลิต เพื่อหาประสิทธิภาพการเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย โดยพิจารณาการเกาะตัวรวมของเส้นใยและของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

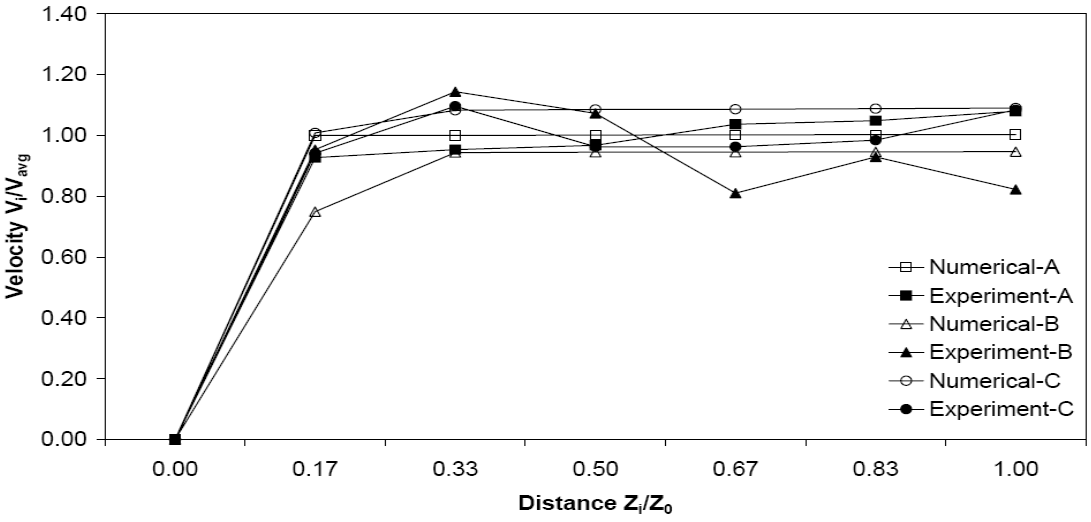
ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาแบบจำลองของห้องพ่นเส้นใยฝ้าย โดยใช้โปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน การประเมินความถูกต้องของโปรแกรมที่เลือกมาใช้ การออกแบบปรับปรุงกระบวนการในการพ้นเส้นใยฝ้ายและส่วนสุดท้ายเป็นการประเมินผลจากการปรับปรุงกระบวนการแล้ว ผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้

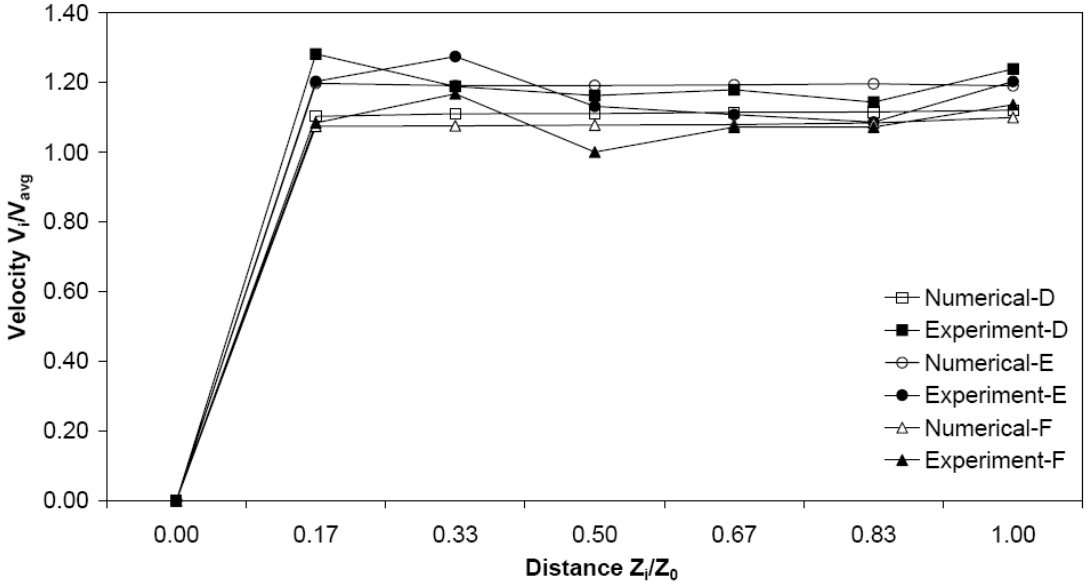
การประเมินความถูกต้องของโปรแกรม

ความเร็วของอากาศภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

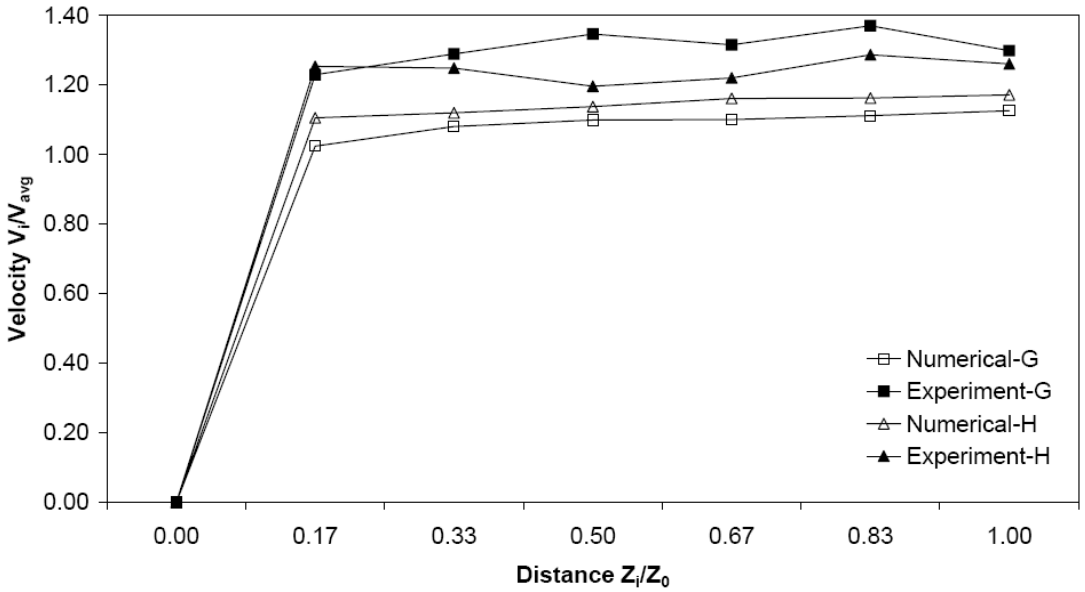
จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาถึงความเร็วของอากาศที่เป็นตัวกลางในการพาเส้นใยฝ้ายไปเคลือบผิวของถุงมือยางนั้น พบว่าอากาศจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนและถูกบีบให้มีความเร็วสูงขึ้นเพื่อพ่นไปยังถุงมือยาง เมื่อนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า ความเร็วในแนวแกน Y ณ ตำแหน่งที่สนใจ มีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 23 ถึงภาพที่ 25 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วในแนวแกน Y ต่ำกว่า 15 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากเครื่องมือวัด หรือสภาวะแวดล้อมของห้องทดลอง



ภาพที่ 23 ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T



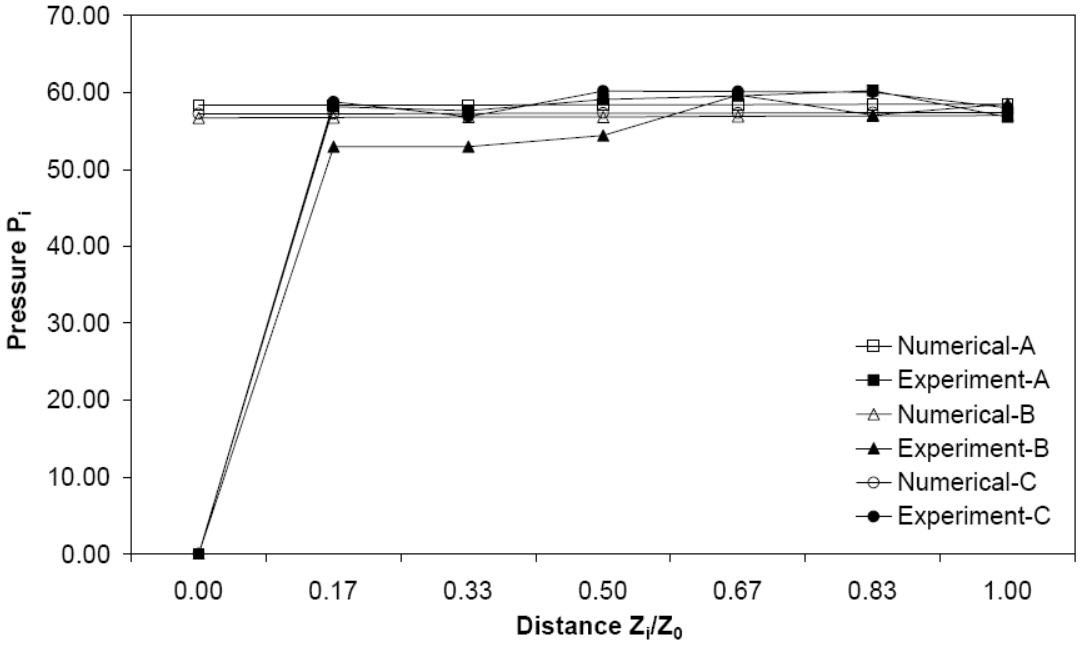
ภาพที่ 24 ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T



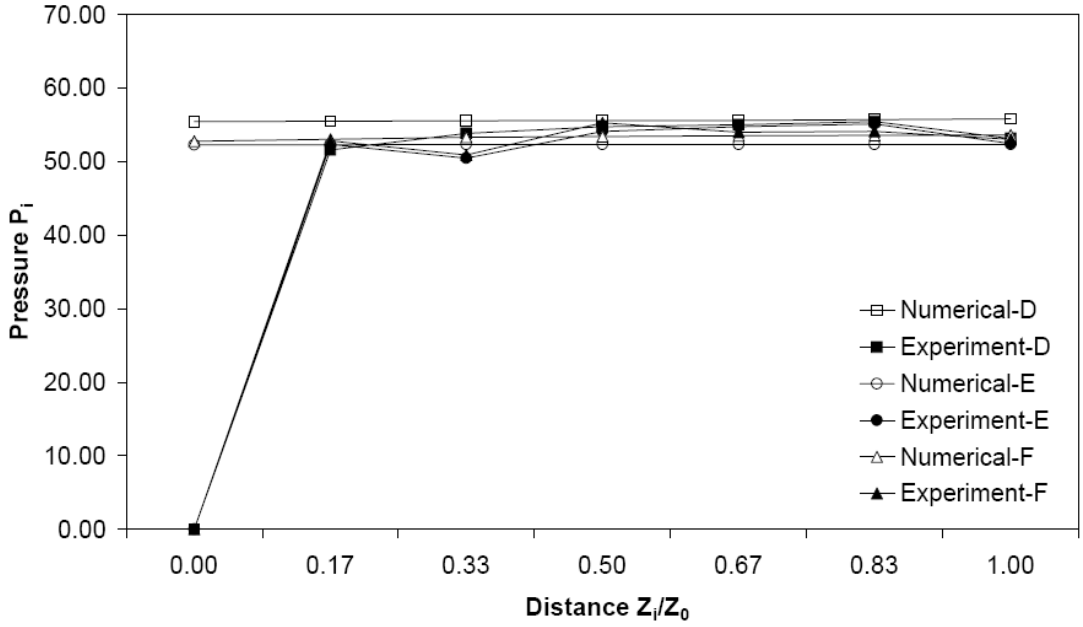
ภาพที่ 25 ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด G และ H ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T

ความดันสถิตของอากาศภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

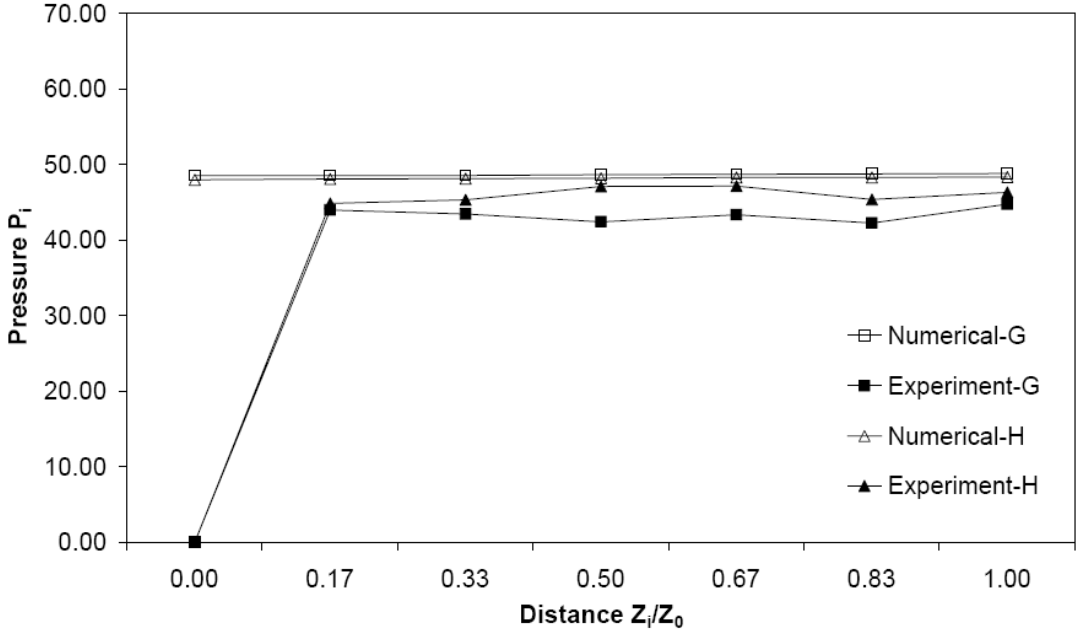
จากการศึกษาพบว่า ผลการจำลองของความดันสถิตภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า ความดันสถิตภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย ณ ตำแหน่งที่สนใจมีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 26 ถึงภาพที่ 28 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความดันสถิตต่ำกว่า 15 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากเครื่องมือวัด หรือสภาวะแวดล้อมของห้องทดลอง



ภาพที่ 26 ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T



ภาพที่ 27 ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T

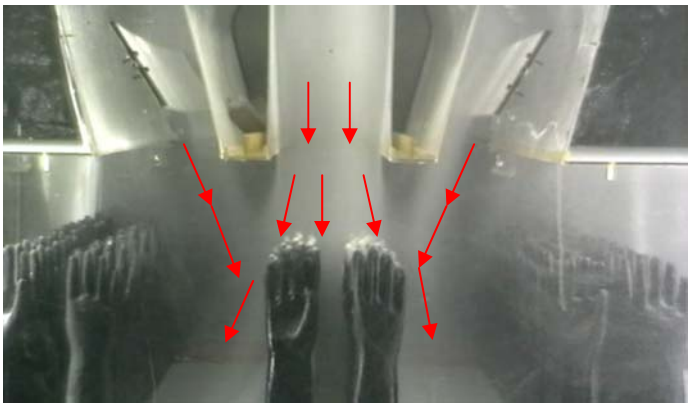


ภาพที่ 28 ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด G และ H ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T

การเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายภายในห้องพ่นเส้นใยและการเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย

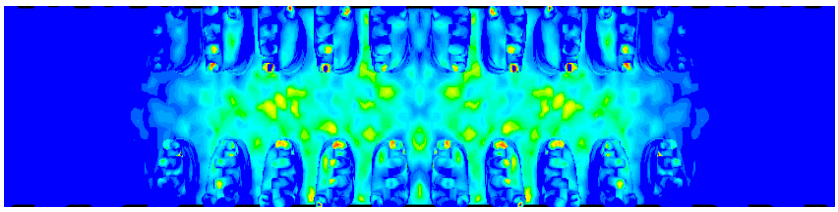
จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการพ่นเส้นใยฝ้ายเข้าไปยังห้องพ่นเส้นใย พบว่า เส้นใยจะถูกอากาศพาให้เคลื่อนที่ โดยจากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการพ่นเส้นใยฝ้าย อนุภาคของเส้นใยฝ้ายไม่มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศ ไม่ว่าจะเป็นความเร็ว หรือ ความดัน โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเส้นใยฝ้ายนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 29 จะเห็นว่า Damper เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศ ซึ่งก็จะทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยจากภาพแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่พ่นมาในช่องการไหลด้านข้างเคลื่อนที่เข้าไปเกาะที่ผิวถุงมือได้ไม่ดีนัก ซึ่งอาจเกิดจากผลของแรงดันของการไหลในช่องการไหลกลาง นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาการเกาะตัวบนพื้นผิวของแม่พิมพ์ถุงมือดังแสดงในภาพที่ 30 และ 31 แล้ว พบว่า เมื่อพิจารณามุมมองด้านบนจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีการเกาะตัวบนพื้นผิวเป็น 49 % ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถุงมือ ขณะที่จากการทดลองมีการเกาะตัวบนพื้นผิวเป็น35% ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถุงมือ และเมื่อพิจารณามุมมองด้านข้างจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ มีการเกาะตัวบนพื้นผิวเป็น 17% ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถุงมือ ขณะที่จากการทดลองมีการเกาะตัวบนพื้นผิวเป็น 20% ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถุงมือ และเมื่อพิจารณาอัตราการไหลมวลของเส้นใย พบว่า จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เส้นใยที่ไหลผ่านช่องของเสียเป็น 2.06 g/s และไหลผ่านช่องการนำกลับมาใช้ใหม่เป็น 5.12 g/s ขณะที่ผลจากการทดลองพบว่าเส้นใยที่ไหลผ่านช่องของเสียเป็น 2.85 g/s และไหลผ่านช่องการนำกลับมาใช้ใหม่เป็น 4.11 g/s ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์



ข) การทดลอง

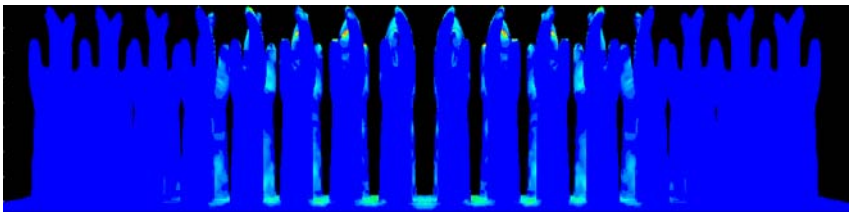
ภาพที่ 29 การเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

ภาพที่ 30 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

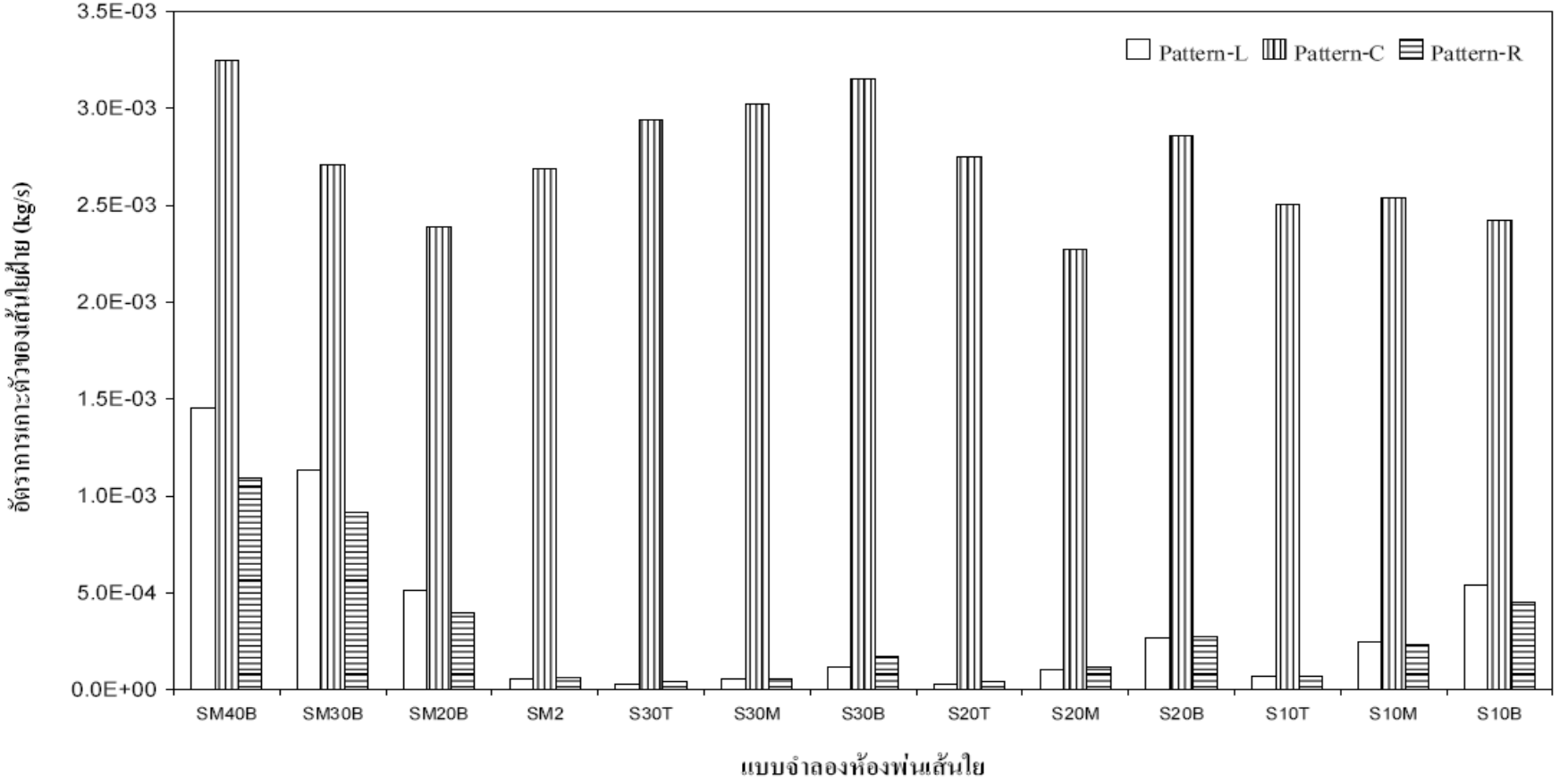
ภาพที่ 31 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T

การออกแบบปรับปรุงกระบวนการในการพ่นเส้นใยฝ้าย

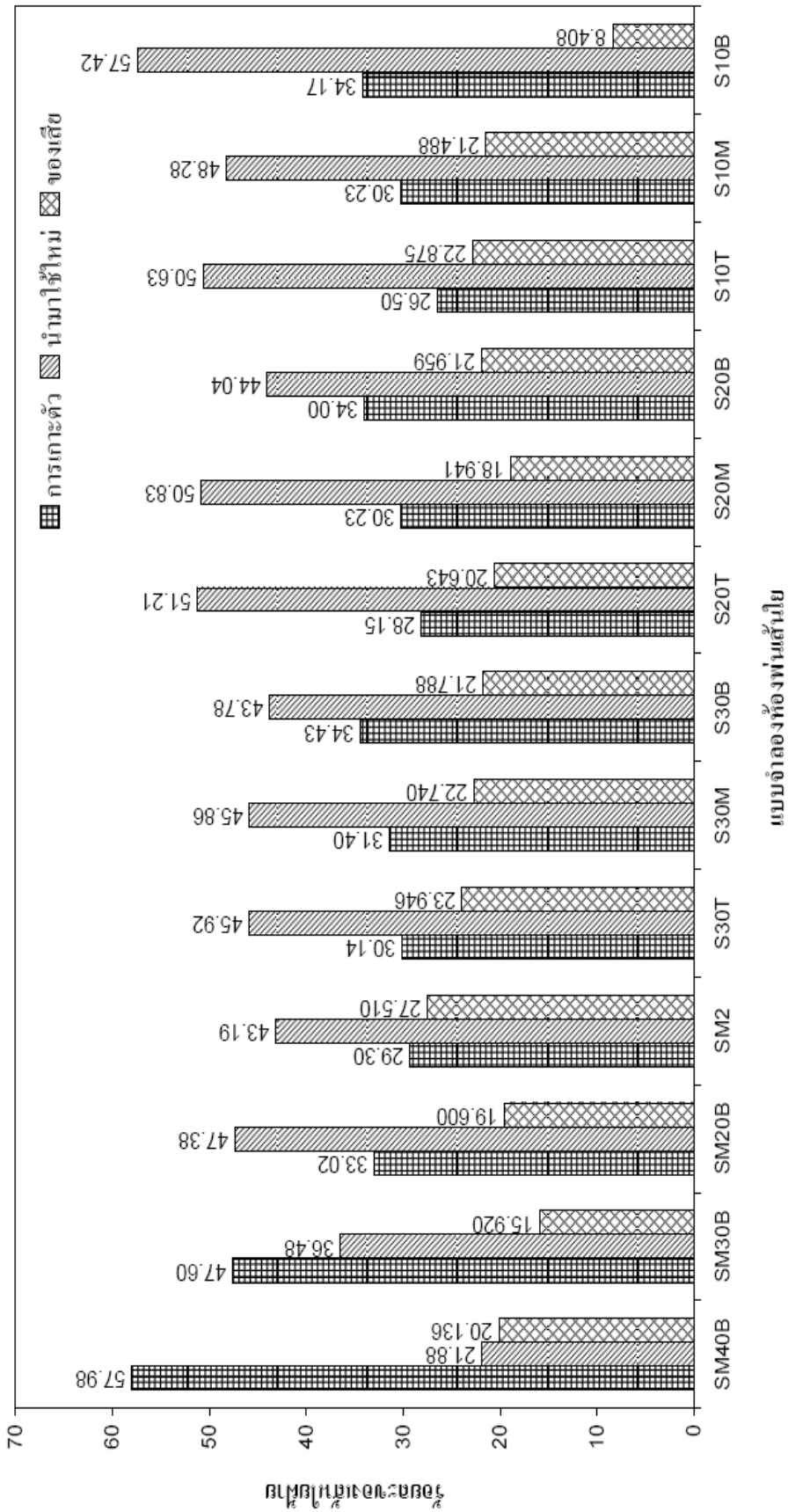
เมื่อทำการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในห้องพ่นเส้นใยฝ้ายที่สนใจ 13 แบบ โดยพิจารณาการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายบนแม่พิมพ์ถุงมือยาง ได้ผลดังตารางที่ 4 และนำผลจากตารางที่ 4 มาสร้างกราฟแท่งแสดงอัตราการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายบนแม่พิมพ์ถุงมือยาง ดังแสดงในภาพที่ 32 และกราฟแท่งแสดงสัดส่วนร้อยละของการใช้ของเส้นใยฝ้าย ดังแสดงในภาพที่ 33

ตารางที่ 4 แสดงอัตราการเกาะตัวบนพื้นที่ผิวของชุดแม่พิมพ์ถุงมือยาง

แบบจำลอง	การเกาะตัวบนแม่พิมพ์ (kg/s)			เส้นใยฝ้าย (kg/s)	
	Pattern-L	Pattern-C	Pattern-R	ของเสีย	นำกลับมาใช้ใหม่
SM40B	1.46E-03	3.25E-03	1.09E-03	2.01E-03	2.19E-03
SM30B	1.14E-03	2.71E-03	9.13E-04	1.59E-03	3.65E-03
SM20B	5.13E-04	2.39E-03	4.01E-04	1.96E-03	4.74E-03
SM2	5.80E-05	2.69E-03	6.20E-05	2.64E-03	4.14E-03
S30T	2.80E-05	2.94E-03	4.40E-05	2.39E-03	4.59E-03
S30M	5.67E-05	3.02E-03	5.93E-05	2.27E-03	4.59E-03
S30B	1.21E-04	3.15E-03	1.70E-04	2.18E-03	4.38E-03
S20T	2.60E-05	2.75E-03	4.07E-05	2.06E-03	5.12E-03
S20M	1.03E-04	2.27E-03	1.17E-04	1.56E-03	4.19E-03
S20B	2.66E-04	2.86E-03	2.73E-04	2.20E-03	4.40E-03
S10T	7.20E-05	2.50E-03	7.33E-05	2.29E-03	5.06E-03
S10M	2.51E-04	2.54E-03	2.33E-04	2.15E-03	4.83E-03
S10B	5.42E-04	2.42E-03	4.55E-04	8.41E-04	5.74E-03



ภาพที่ 32 แสดงอัตราการเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย บนแม่พิมพ์ถุงมือยางจากการจำลอง



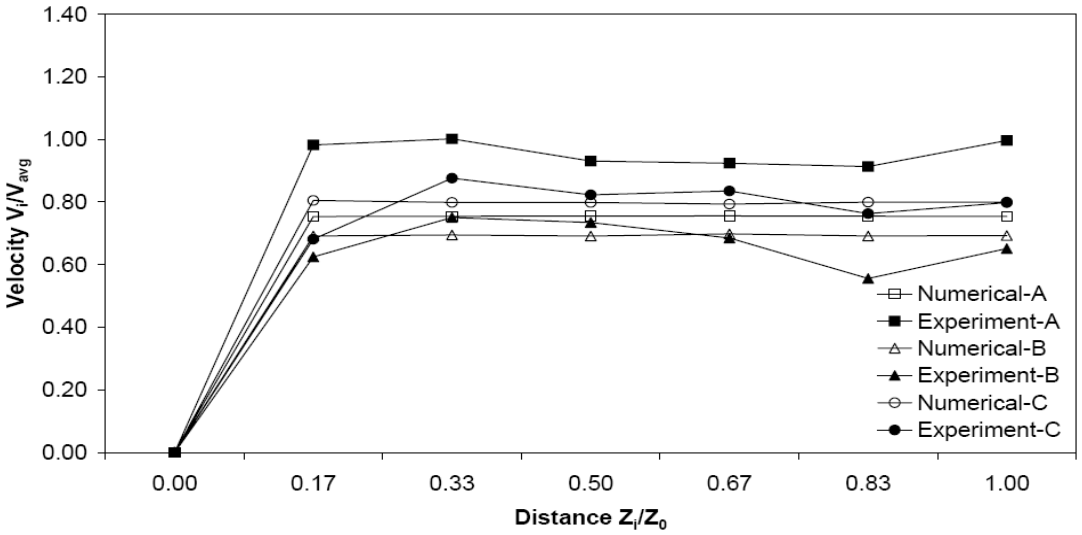
ภาพที่ 33 แสดงอัตราส่วนร้อยละของการใช้ของเสียใยฝ้าย ในการจำลองการพ่นสั้นใย

จากตารางที่ 4 และภาพที่ 32 และ 33 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B มีอัตราการเกาะตัวที่ผิวของแม่พิมพ์แต่ละชุดมากที่สุด โดยที่ Pattern-C มีการเกาะตัวด้วยอัตรา 3.25E-03 kg/s, Pattern-L มีการเกาะตัวด้วยอัตรา 1.46E-03 kg/s และ Pattern-R มีการเกาะตัวด้วยอัตรา 1.09E-03 kg/s และเมื่อพิจารณาสัดส่วนร้อยละของการใช้ของเส้นใยฝ้าย ดังแสดงในภาพที่ พบว่า สัดส่วนการใช้เส้นใยฝ้ายของแบบจำลอง มีสัดส่วนการใช้เส้นใยฝ้ายที่เคลื่อนที่ไปเกาะติดที่ชุดแม่พิมพ์สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลข้างต้น

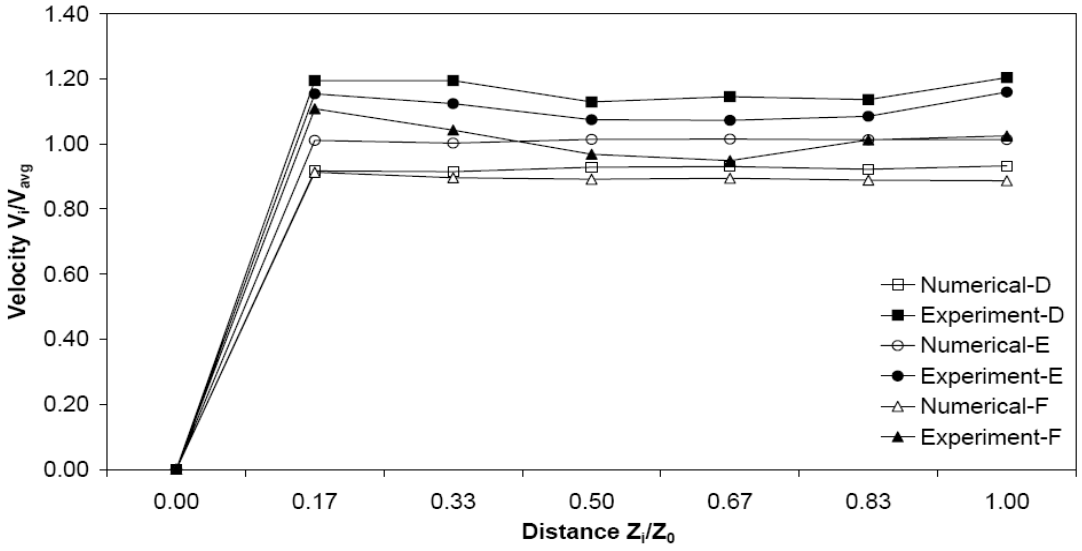
การประเมินผลจากการปรับปรุงกระบวนการ

ความเร็วของอากาศภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

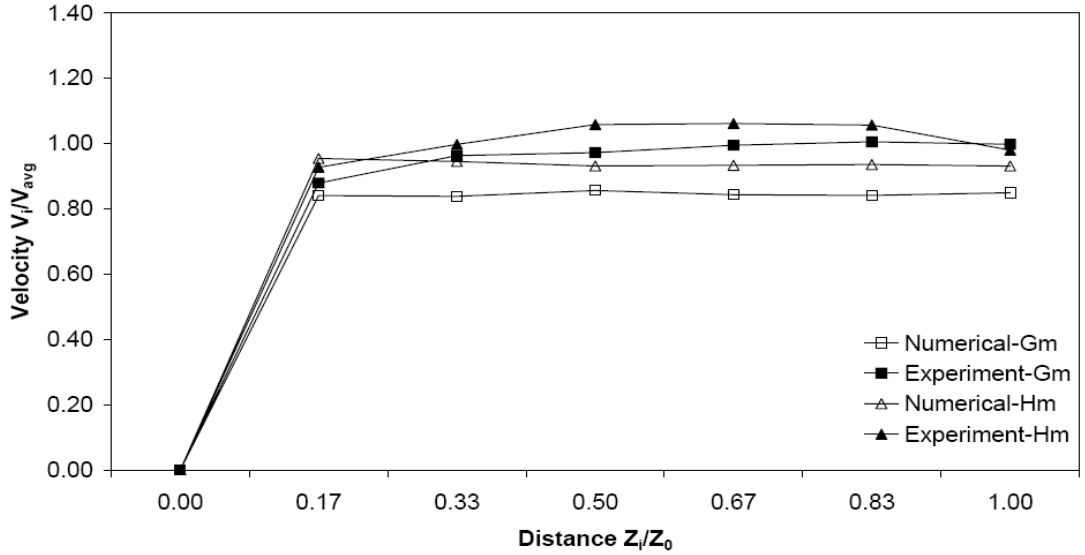
จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาถึงความเร็วของอากาศที่เป็นตัวกลางในการพาเส้นใยฝ้ายไปเคลือบผิวของถุงมือยางนั้น พบว่า อากาศจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนและถูกบีบให้มีความเร็วสูงขึ้นเพื่อพ่นไปยังถุงมือยาง เมื่อนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า ความเร็วในแนวแกน Y ณ ตำแหน่งที่สนใจ มีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในภาพที่ 34 ถึงภาพที่ 36 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วในแนวแกน Y ต่ำกว่า 15 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากเครื่องมือวัด หรือสภาวะแวดล้อมของห้องทดลอง



ภาพที่ 34 ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B



ภาพที่ 35 ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B

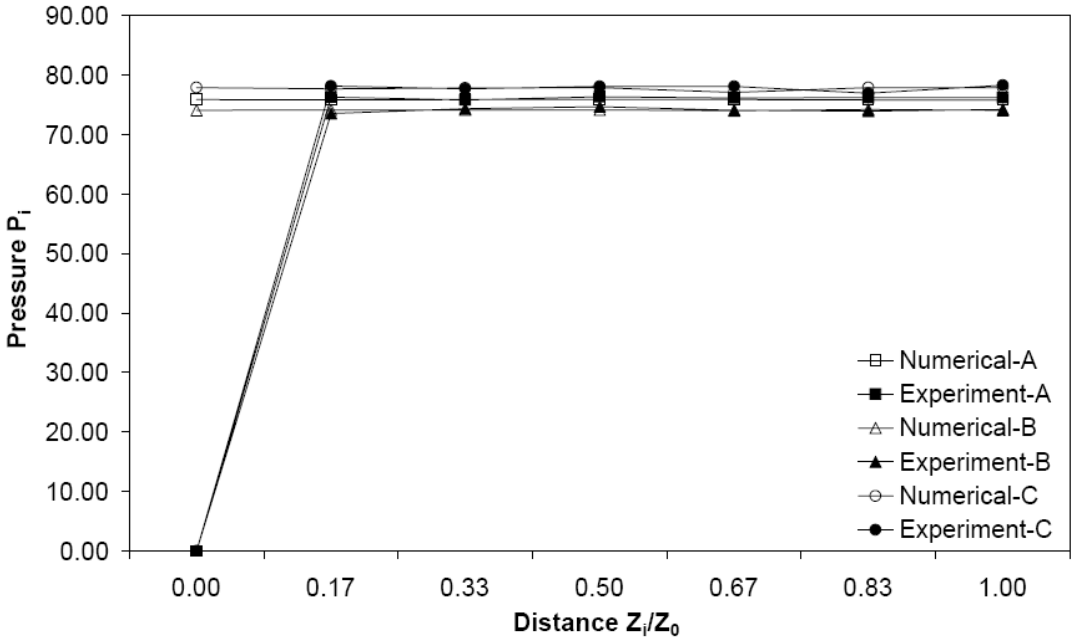


ภาพที่ 36 ความเร็วในแนวแกน Y เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด Gm และ Hm ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B

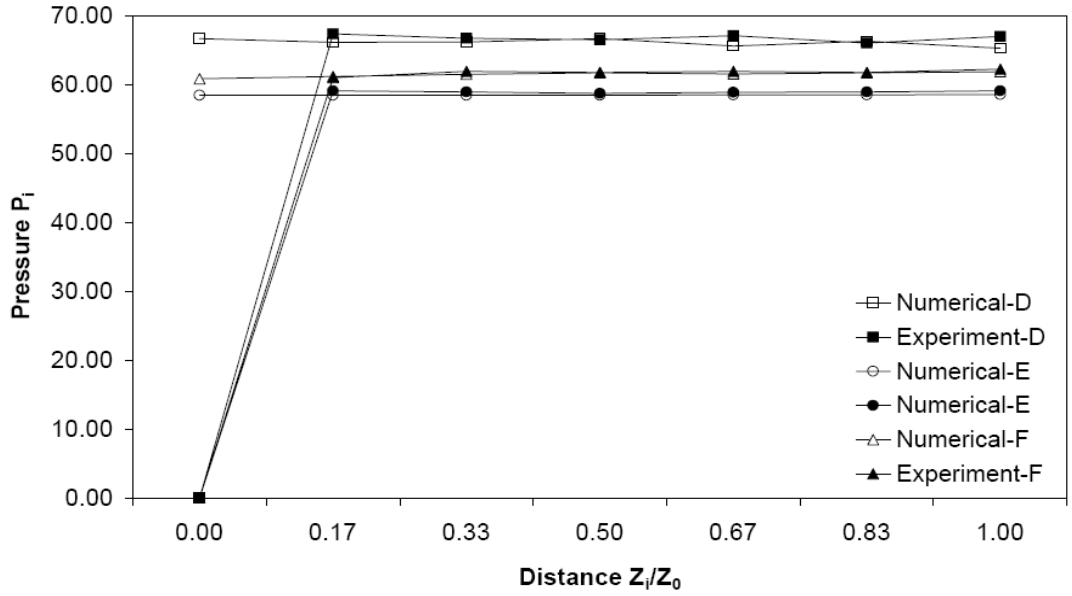
หมายเหตุ: จุด Gm และ Hm คือ ตำแหน่งใหม่ในการวัดค่า เนื่องจากการเปลี่ยนมุมองศาแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper) เป็นลบ

ความดันสถิตของอากาศภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย

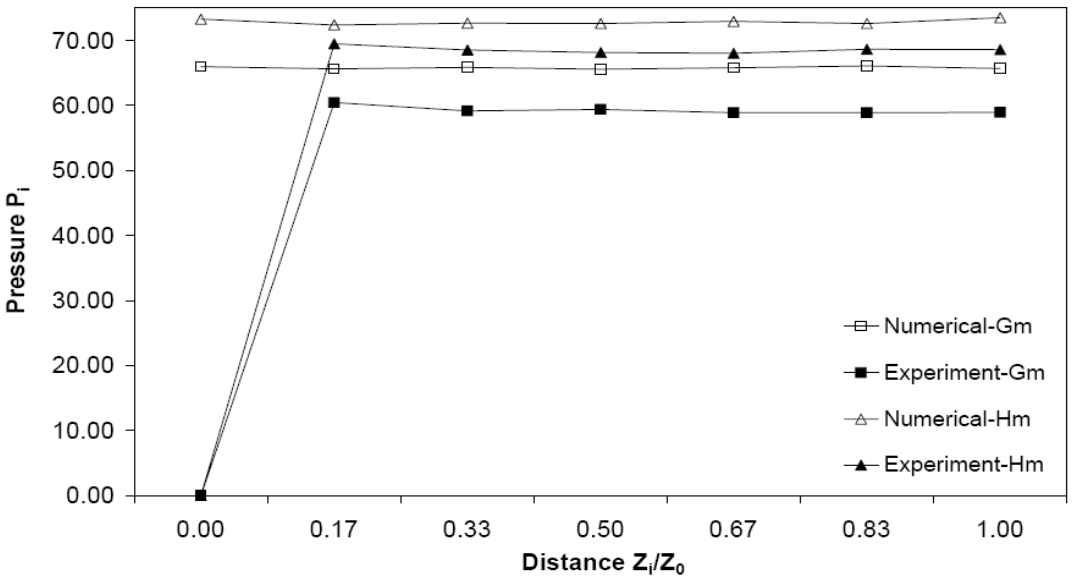
จากการศึกษาพบว่าผลการจำลองของความดันสถิตภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า ความดันสถิตภายในห้องพ่นเส้นใยฝ้าย ณ ตำแหน่งที่สนใจมีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 37 ถึง ภาพที่ 39 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความดันสถิตต่ำกว่า 12 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากเครื่องมือวัด หรือสภาวะแวดล้อมของห้องทดลอง



ภาพที่ 37 ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลอง ที่จุด A, B และ C ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B



ภาพที่ 38 ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด D, E และ F ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B

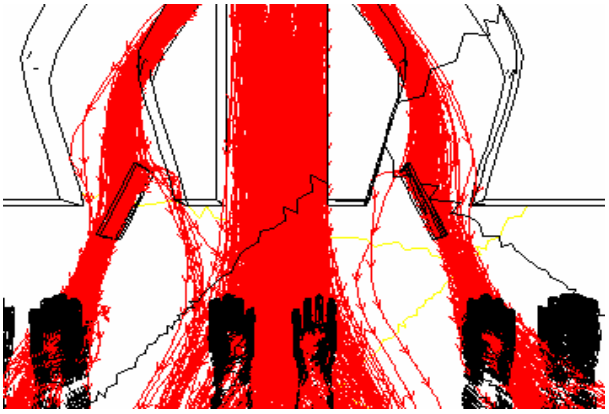


ภาพที่ 39 ความดันสถิตเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองที่จุด Gm และ Hm ของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B

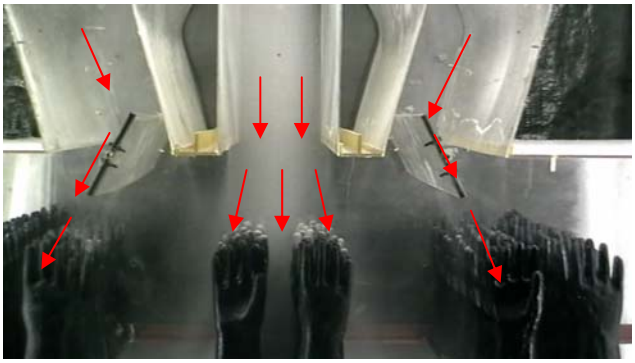
หมายเหตุ: จุด Gm และ Hm คือ ตำแหน่งใหม่ในการวัดค่า เนื่องจากการเปลี่ยนมุมองศาแผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper) เป็นลบ

การเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายภายในห้องพ่นเส้นใยและการเกาะตัวของเส้นใยฝ้าย

จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการพ่นเส้นใยฝ้ายเข้าไปยังห้องพ่นเส้นใย พบว่าเส้นใยจะถูกอากาศพาให้เคลื่อนที่ โดยจากการศึกษาพบว่าเมื่อมีการพ่นเส้นใยฝ้าย อนุภาคของเส้นใยฝ้ายไม่มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศ ไม่ว่าจะเป็นความเร็ว หรือ ความดัน โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเส้นใยฝ้ายนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 40 จะเห็นว่าเมื่อทำการปรับ Damper ให้มีการพ่นเส้นใยไปยังชุดแม่พิมพ์ Pattern-L และ Pattern-R เส้นใยสามารถเคลื่อนที่เข้าไปเกาะที่ผิวถุงมือได้ดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาการเกาะตัวบนพื้นผิวของแม่พิมพ์ถุงมือสามารถแสดงการกระจายตัวและเกาะตัวดังภาพที่ 41 ถึงภาพที่ 46 และดังตารางที่ 5

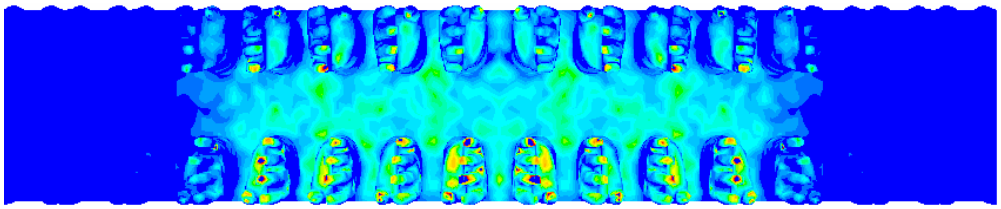


ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์



ข) การทดลอง

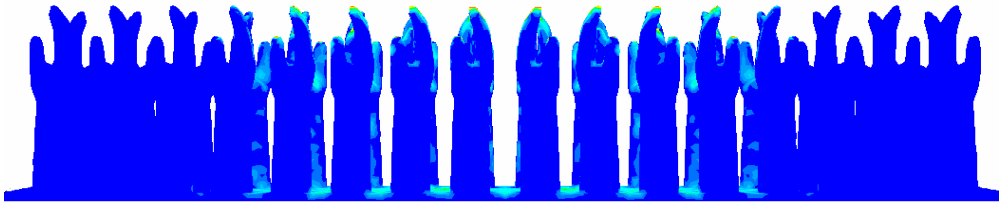
ภาพที่ 40 การเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

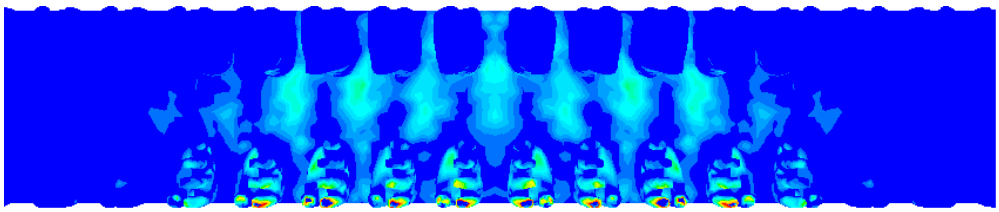
ภาพที่ 41 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ Pattern-C



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

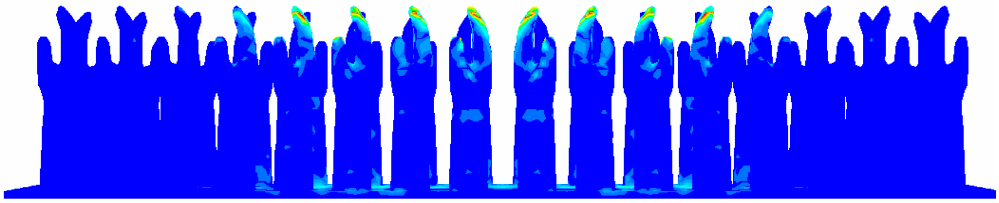
ภาพที่ 42 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ Pattern-C



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

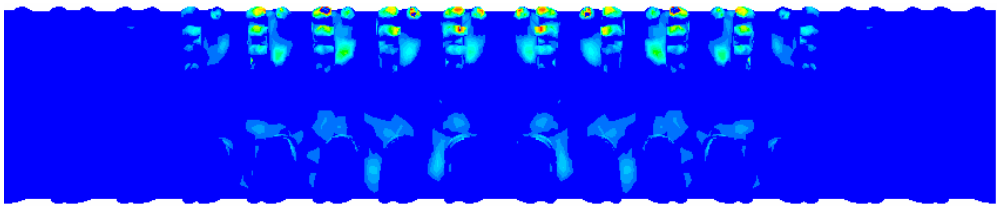
ภาพที่ 43 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ Pattern-L



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

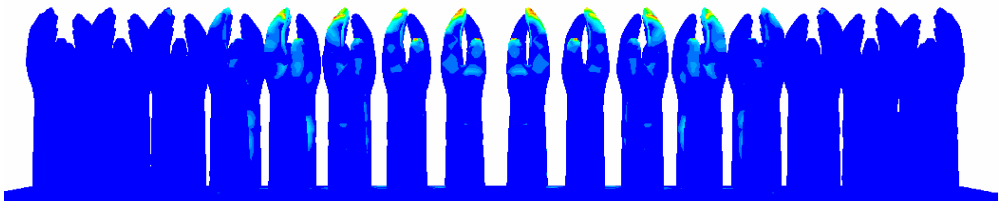
ภาพที่ 44 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ Pattern-L



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

ภาพที่ 45 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านบนของชุดแม่พิมพ์ Pattern-R



ก) การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ข) การทดลอง

ภาพที่ 46 การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ภาพมุมมองด้านข้างของชุดแม่พิมพ์ Pattern-R

ตารางที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายบนพื้นที่ผิวของชุดแม่พิมพ์ถุงมือยางของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B

ชุดแม่พิมพ์		พื้นที่การเกาะตัวบนแม่พิมพ์ (%)	
		ด้านข้าง	ด้านบน
Pattern-C	Experimental	12.89	31.10
	Numerical	8.99	31.02
Pattern-L	Experimental	7.91	28.23
	Numerical	8.66	29.43
Pattern-R	Experimental	9.59	14.86
	Numerical	6.05	12.36

และเมื่อพิจารณาอัตราการไหลมวลของเส้นใย พบว่า จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เส้นใยที่ไหลผ่านช่องของเสียเป็น 2.01 g/s และไหลผ่านช่องการนำกลับมาใช้ใหม่เป็น 2.19 g/s ขณะที่ผลจากการทดลองพบว่า เส้นใยที่ไหลผ่านช่องของเสียเป็น 2.03 g/s และไหลผ่านช่องการนำกลับมาใช้ใหม่เป็น 3.17 g/s ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

จากผลการจำลองและการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่า การเคลื่อนที่ไปเกาะที่ผิวของเส้นใยฝ้ายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการปรับแผ่นปรับรูปแบบการไหล โดยการปรับรูปแบบการไหลในช่องการไหลด้านข้างให้พ่นไปยัง Pattern-L และ Pattern-R เป็นการหลีกเลี่ยงผลของการไหลในช่องการไหลกลาง ทำให้การเกาะตัวรวมของแบบจำลองห้องพ่นเส้นใย (SM40B) มีค่ามากขึ้นประมาณ 15 % และสามารถลดของเสียได้ประมาณ 29 % เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของกระบวนการแบบเดิม (S20T) ซึ่งมีการพ่นเส้นใยไปยัง Pattern-C อย่างเดียว โดยจะไปเพิ่มการเกาะตัวที่ด้านข้างของชุดแม่พิมพ์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการพ่นเส้นใยฝ้ายในแบบแบบจำลองการพ่นเส้นใยฝ้ายแบบต่างๆ ทั้งในกระบวนการทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้าย ของอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง พบว่า

การนำคอมพิวเตอร์และโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการทำนายการไหลที่เป็นแบบหลายสถานะของกระบนการพ่นเส้นใยฝ้าย สามารถทำนายได้สอดคล้องใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 15 %

จากการศึกษาพบว่าการไหลในช่องการไหลกลาง มีผลกระทบต่อกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายของช่องการไหลด้านข้างทำให้การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายไม่ดี และเมื่อทำการปรับองศาและตำแหน่งของแผ่นปรับรูปแบบการไหล ซึ่งทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายภายในห้องพ่นเส้นใยเปลี่ยนแปลง โดยสามารถทำให้มีการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงได้

เมื่อทำการจำลองการพ่นเส้นใยฝ้ายในแบบจำลองแบบต่าง 13 แบบ พบว่า แบบจำลองห้องพ่นเส้นใย SM40B ให้ผลของการเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายดีที่สุดโดยมีเส้นใยเคลื่อนที่ไปเกาะที่ผิวแม่พิมพ์ถุงมือแต่ละชุดมากที่สุด (Pattern-L=1.46E-03 kg/s, Pattern-R=1.09E-03 kg/s และ Pattern-C=3.25E-03 kg/s) โดยเมื่อคิดเป็นปริมาณการใช้เส้นใยพบว่า ประมาณ 57.98 เปอร์เซ็นต์ของเส้นใยที่ใช้ในการพ่นจะเคลื่อนที่ไปเกาะที่ผิวแม่พิมพ์ถุงมือ (ใน 1 วินาทีแรก) นอกจากนี้การเกาะตัวรวมของแบบจำลอง (แบบจำลองห้องพ่นเส้นใยSM40B) มีค่ามากขึ้นประมาณ 15 % และสามารถลดของเสียได้ประมาณ 29 % เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของกระบวนการแบบเดิม (แบบจำลองห้องพ่นเส้นใย S20T)

ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้นทางคอมพิวเตอร์นั้นยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากแบบจำลองของความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะลองเปลี่ยนแบบจำลองความปั่นป่วนเป็นแบบอื่น เช่น $k-\omega$ หรือ LES

2. การจำลองกระบวนการทางคอมพิวเตอร์แบบ Discrete phase model สำหรับปัญหาที่มีอนุภาคจำนวนมากผสมอยู่ จำเป็นจะต้องใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์จำนวนมาก เพื่อลดความต้องการทางคอมพิวเตอร์ อาจจะเปลี่ยนกระบวนการทางคอมพิวเตอร์เป็นแบบ Eulerian-Eulerian model

3. เนื่องจากการเคลื่อนที่ของชุดแม่พิมพ์เป็นการเคลื่อนที่บนสายพานลำเลียง ทำให้มีช่องว่างระหว่างชุดแม่พิมพ์ ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ทำให้เกิดของเสียได้หากเส้นใยเหล่านั้นเคลื่อนที่ไปยังท่อเก็บของเสีย ดังนั้น อาจจะทำการออกแบบหรือเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเก็บของเสียใหม่น่าจะเพิ่มการเกาะตัวของเส้นใยและลดของเสียได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ณรงค์ พิทักษ์ทรัพย์สิน และ ประสิทธิ์ วัฒนวงศ์สกุล. 2550. **วิศวกรรมย้อนรอย กับการสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), กรุงเทพฯ.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2545. **ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วรางค์รัตน์ จันทสาโร. 2548. **วิธีปริมาตรจำกัดสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2547. **พื้นที่ปลูกยางของประเทศไทย**. สถิติยาง. แหล่งที่มา: http://www.rubberthai.com, 30 มีนาคม 2552.

ศูนย์การศึกษานอกโรงเรียนภาคใต้. 2550. **ผลิตภัณฑ์ยางพารา**. การเรียนรู้ผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ด้วยตนเอง. แหล่งที่มา: http://south.nfe.go.th/inder.php, 8 พฤษภาคม 2550.

ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. 2550. **ข้อมูลเชิงสถิติอุตสาหกรรมยาง**. บริการข้อมูล. แหล่งที่มา: http://www.rubbercenter.org/index.php, 8 พฤษภาคม 2550.

Akilli, H., E.K. Levy and B. Sahin. 2001. Gas–solid flow behavior in a horizontal pipe after a 90° vertical-to-horizontal elbow. **Powder Technology** 116 (1): 43-52.

Baughn J.W., H. Iacovides, D.C. Jackson and B.E. Launder. 1987. Local heat transfer measurements in turbulent flow around a 180° pipe bend. **Journal of Heat Transfer** 109 (1): 43-48.

Crowe, C., M. Summerfield and T. Yutaka. 1998. **Multiphase flows with droplets and particles**. CRC press LLC, Florida, United State of America.

FLUENT INC. 2001. **FLUENT 6.0. User's Guide**. Lebanon, NH, U.S.A.

Fox, R.W., A.T. McDonald, and P.J. Pritchard. 2003. **Introduction to fluid dynamics**. John Wiley & Sons. USA.

Heinl, E. and M. Bohnet. 2005. Calculation of particle-wall adhesion in a horizontal gas-solids flow using CFD. **Powder Technology** 159: 95-104.

Hidayat, M and A. Rasmuson. 2005. Some aspects on gas-solid flow in a U-bend: Numerical investigation. **Powder Technology** 153: 1-12.

_____. 2007. A computational investigation of non-isothermal gas-solid flow in a U-bend. **Powder Technology** 175: 104-114.

Levy, A. and M. Sayed. 2007. Numerical simulations of the flow dilute granular materials around obstacles. **Powder Technology**.

Mainza, A., M. Narasimha, M.S. Powell, P.N. Holtham and M. Brennan. 2006. Study of flow behaviour in three-product cyclone using computational fluid dynamics. **Minerals Engineering** 19: 1048-1058.

Mazur, Z., R. Compos-Amezcua, G. Urquiza-Beltran and A. Gutierrez. 2004. Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop value of a steam turbine. **Applied Thermal Engineering** 24: 1877-1891.

Shah, U., J. Zhu, C. Zhang and J.H. Nother Senior. 2006. Numerical investigation of coarse powder and air flow in an electrostatic powder coating process. **Powder Technology** 164: 22-32.

Vuthaluru, H.B., V.K. Pareek and R. Vuthaluru. 2005. Multiphase flow simulation of simplified coal puleriser. **Fluel Processing Technology** 86: 1195-1205.

Versteeg, H.K. and W. Malalasekera. 1995. **An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Longman Scientific & Technical, London, England.

Wang, B., D.L. Xu, K.W. Chu and A.B. Yu. 2006. **Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator**. **Applied Mathematical Modeling** 30: 1326-1342.

White, F.M. 1999. **Fluid Mechanics**. McGraw-Hill, Singapore.

Wikipedia. 2009. **Units of textile measurement**. Article. Available source: http://en.wikipedia.org/wiki/Units_of_textile_measurement, 18 July 2007.

Yoshida, H., Kouichro Ono and Fukui. 2005. The effect of new method of fluid flow control on submicron particle classification in gas-cyclone. **Powder Technology** 149: 139-147.

Zhang, Z. and Q. Chen. 2006. Experimental measurements and numerical simulation of particle Transport and distribution in ventilated rooms. **Atmospheric Environment** 40: 3396-3408.

ภาคผนวก

การคำนวณหาค่าตัวเลขเรย์โนลดส์

จากสมการการหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ จะนำมาใช้ในการพิจารณาว่าระบบที่ทำการศึกษานั้นมีการไหลรูปแบบการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) หรือแบบปั่นป่วน (Turbulent) โดยพิจารณาคุณสมบัติของอากาศ ที่สภาวะความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิห้อง

- ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) = 1.177 kg/m^3
- ความหนืดสมบูรณ์ของอากาศ(μ) = 1.846×10^{-5} N.s/m^2
- ความเร็วเฉลี่ยที่ Inlet flow = 4.5 m/s
- Hydraulic diameter (D_h) ของ Inlet flow

$$D_h = \frac{4\times area}{wetted\ \ perimeter}$$

$$D_h = \frac{4\times 0.301}{2.37} = 0.5081 \quad m$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{1.17\times 4.5\times 0.5081}{1.846\times10^{-5}} = 144915$$

การคำนวณหาอัตราส่วนเชิงปริมาตรของของไหลอนุภาค (Dispersed phase, α_d)

อัตราส่วนเชิงปริมาตรของของไหลอนุภาค เป็นตัวช่วยในการพิจารณาวิธีการทางคอมพิวเตอร์ในการจำลองการไหลแบบหลายเฟส โดย เมื่ออัตราส่วนเชิงปริมาตรของของไหลอนุภาคมีค่าน้อยกว่า 10 % จะใช้วิธีการทางคอมพิวเตอร์แบบ Lagrangian approach ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนที่ที่เป็นไปได้ของอนุภาคทั้งหมดบน Lagrangian frame และสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\alpha_d = \frac{V_d}{V} = \frac{\dot{m}/\rho}{Av}$$

$$\alpha_d = \frac{0.01/1648.8}{0.3686 \times 0.8175 \times 4.5}$$

$$\alpha_d = 0.0000043$$

$$\alpha_d = 0.00043 \quad \%$$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายปิยวุฒิ แก้วฤทธิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 ธันวาคม พ.ศ.2524
สถานที่เกิด	จังหวัดศรีสะเกษ
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัยระดับมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (MAG) จาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.)