

บทที่ 3

ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมรายละเอียดของผลการวิจัยเรื่องการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโดในเครื่องเอกซ์ทรูชันด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยแบ่งการนำเสนอผลการวิจัยออกเป็นสามส่วนหลักคือ ส่วนแรกแสดงถึงผลทดสอบหาคคุณสมบัติทางกายภาพและแบบสมการวิทยากระแสของแป้งโดข้าวเจ้า ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ผลเพื่อยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีที่ประยุกต์ใช้เพื่อการจำลองการไหล และส่วนที่สามของผลวิจัยแสดงถึงผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้งโดข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์อาหารด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องระหว่างกระบวนการแปรรูป

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิทยากระแส

3.1.1 ผลการวัดความหนาแน่น

ตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความหนาแน่นของตัวอย่างในลักษณะที่ปรากฏวัดได้เท่ากับ 1200 kg/m^3

3.1.2 ผลการวัดความหนืด

ลักษณะทางกายภาพของแป้งโดข้าวเจ้าสุก

แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการวัดความหนืดโดยเครื่อง capillary rheometer ในช่วงอุณหภูมิ $90 - 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่องดังรูปที่ 3.1 และมีลักษณะนุ่ม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1mm เส้นมีความเรียบเนียนต่อเนื่อง แป้งที่ออกมาจากกระบวนการวัดความหนืดนั้นจะมีกลิ่นหอมที่บ่งบอกถึงความสุกของแป้ง



รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของแป้งโดข้าวเจ้าสุกหลังผ่านกระบวนการวัดความหนืด

ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าสุกที่ผลิตได้จากเครื่องวัดความหนืด

ความชื้นของตัวอย่างแป้งโดข้าวเจ้ามีผลต่อความหนืดของแป้งโดสุกโดยตรง เนื่องจากปริมาณความชื้นในเม็คแป้งมีผลต่อกระบวนการไหลขณะแป้งโดถูกแปรรูปให้สุกภายในเครื่องมือวัดความหนืด ดังนั้นคุณสมบัติความหนืดของแป้งโดที่มีต่อการต้านทานการไหลจึงเปลี่ยนไปตามปริมาณความชื้นที่ปรากฏขณะทำการทดสอบ ทั้งนี้หลักการวัดความหนืดด้วยเครื่อง capillary rheometer เป็นการอัดรีดแป้งโดข้าวเจ้าผ่านหัวคายซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีผลทำให้ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าสุกที่ไหลออกจากหัวคายของเครื่องมือทดสอบมีค่าแตกต่างไปจากแป้งโดอัดตัวที่ถูกทำให้สุกอยู่ในถ้วยทดสอบ ปริมาณความชื้นของแป้งโดสุกที่ไหลออกจากเครื่องมือวัดความหนืดเมื่อเทียบกับความชื้นของแป้งโดที่ใช้ทดสอบแตกต่างกันสามระดับแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าจากค่าความชื้นของแป้งโดสุกที่อุณหภูมิทดสอบทั้ง 3 ค่าของแต่ละชุดแป้งโดที่มีค่าความชื้นตั้งต้นเท่ากัน มีค่าความชื้นไม่แตกต่างกันไม่มากและไม่ปรากฏว่าที่อุณหภูมิทดสอบสูงขึ้นปริมาณความชื้นที่เหลือจะน้อยลงแสดงให้เห็นว่าไม่มีปรากฏการณ์การระเหยของไอน้ำเกี่ยวพันขณะทำการทดสอบวัดค่าความหนืดซึ่งสอดคล้องกับการไม่สังเกตเห็นไอน้ำขณะที่แป้งโดสุกไหลออกจากหัวคาย และจากการที่ค่าความชื้นของแป้งโดสุกมีค่าน้อยกว่าแป้งโดดิบก่อนทดสอบในทุกกรณีจึงน่าจะมีสาเหตุมาจากการดูดความชื้นไว้โดยเม็คแป้งในถ้วยทดสอบของเครื่องมือขณะทำการวัดความหนืดซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่มากกว่าตัวอย่างที่ถูกอัดรีดไหลผ่านหัวคาย ดังนั้นการระบุหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดต่อความชื้นควรระบุให้ชัดเจนว่าเป็นค่าความชื้นของแป้งโดดิบหรือแป้งโดสุก

ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้า (% แบบเปียก)	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าสุก (% แบบเปียก)			Average
		1	2	2	
47	90	28.95	27.69	28.71	28.45
	105	30.68	29.61	28.83	29.71
	120	30.00	31.51	30.03	30.51
54	90	39.93	34.75	42.81	39.16
	105	38.80	28.62	31.42	32.98
	120	37.65	40.35	39.64	39.21
60	90	40.93	42.05	47.34	43.44
	105	44.36	47.37	44.44	45.39
	120	43.86	47.44	44.61	45.30

ผลของค่าความหนืด

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของแป้งโดข้าวเจ้าสุกพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นกับอิทธิพลของอัตราเฉือนและอุณหภูมิที่ใช้แปรรูปซึ่งอธิบายได้จากแบบสมการ power law fluid models (Gibson, 1998) ดังปรากฏในรูปสมการที่ (3-1) และสมการที่ (3-2) ตามลำดับดังนี้

$$\eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (3-1)$$

$$\eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \times \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (3-2)$$

เมื่อให้ η = ค่าความหนืดที่ปรากฏ $\dot{\gamma}$ = อัตราเฉือน k = สัมประสิทธิ์ประกอบสมการวิทยากระแส n = สัมประสิทธิ์บ่งชี้พฤติกรรมการไหลภายใต้ความเค้นเฉือนตามสมการวิทยากระแส T = อุณหภูมิตัวอย่าง และ T_0 = อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ทดสอบหาค่า k และ n

ค่าคงที่ k และ n ในแบบสมการ power law ประมาณได้จากการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่แปรตามค่าอัตราเฉือนด้วยการใช้เทคนิคการหาตัวแปรไม่ทราบค่าโดยใช้วิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ค่าคงที่ทั้งสองสำหรับแป้งโดข้าวเจ้าสุกพร้อมทั้งค่าความหนืดต่ำสุดและค่าประมาณการความหนืดสูงสุดของแต่ละความชื้นและอุณหภูมิอ้างอิงสรุปไว้ในตารางที่ 3.2 แบบสมการวิทยากระแสดังกล่าวนี้นี้มีความสำคัญมากในการใช้เพื่องานจำลองพฤติกรรมการไหลในกระบวนการแปรรูปแป้งโดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อนำข้อมูลไปพัฒนาหรือสร้างเครื่องมือในการแปรรูปแป้งโดข้าวเจ้า

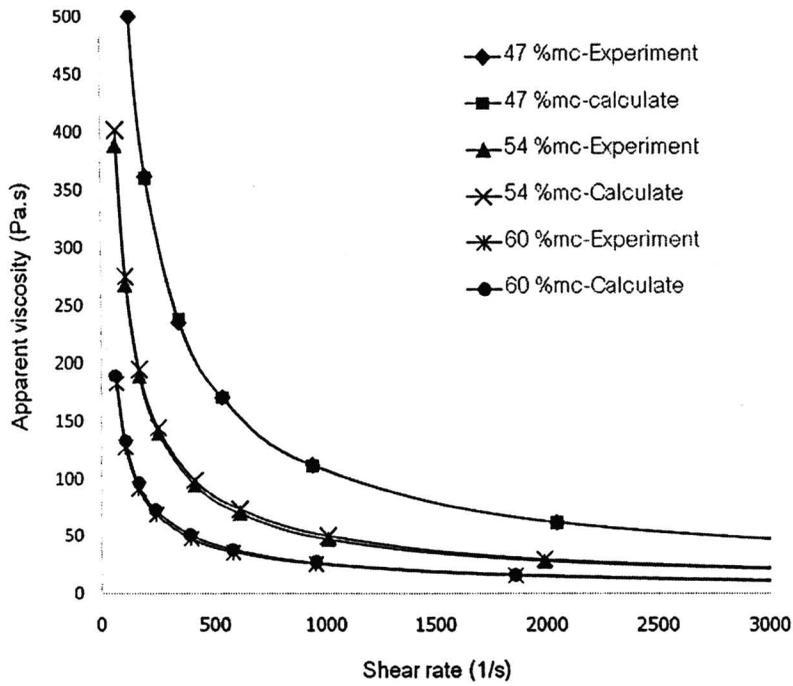
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแป้งโดข้าวเจ้า

ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	จำนวนครั้ง	ค่าคำนวณ		ค่าเฉลี่ย		η_{max} (Pa.s)	η_{min} (Pa.s)
			k	n	K	n		
47	90	1	6525.76	0.2466	7213.01	0.2438	3437.15	3.25
		2	7476.99	0.2468				
		3	7636.28	0.2380				
	105	1	8600.95	0.1362	7308.43	0.2046		
		2	5632.45	0.2521				
		3	7691.88	0.2254				
	120	1	1498.34	0.3484	1148.46	0.4020		
		2	878.79	0.4317				
		3	1068.24	0.4260				
54	90	1	1933.69	0.2947	3439.06	0.2437	1624.55	1.48
		2	5234.65	0.2280				
		3	3148.83	0.2083				
	105	1	976.25	0.3857	1643.97	0.3044		
		2	1711.83	0.2816				
		3	2243.85	0.2458				
	120	1	673.23	0.3378	719.32	0.3296		
		2	847.08	0.3151				
		3	637.63	0.3360				
60	90	1	1036.19	0.2805	1427.96	0.2730	727.84	0.9
		2	2308.68	0.2403				
		3	939.01	0.2983				
	105	1	1928.46	0.1391	1173.48	0.2416		
		2	957.89	0.2710				
		3	634.08	0.3147				
	120	1	325.37	0.3664	293.60	0.4220		
		2	89.43	0.5965				
		3	466.00	0.3029				

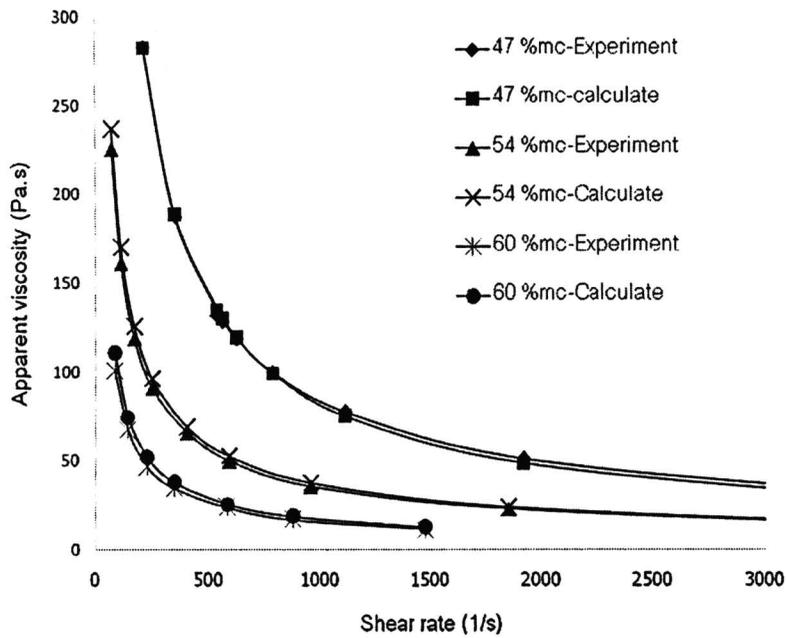
ภาพการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดปรากฏภายใต้อิทธิพลของค่าอัตราเฉือนของตัวอย่างที่มีระดับความชื้นตั้งต้นต่างกันสามค่าของทั้งสามค่าอุณหภูมิทดสอบที่ 90, 105, 120 °C แสดงไว้ดังรูปที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดของแป้ง โคข้าวเจ้าสุกมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราเฉือนเพิ่มสูงขึ้นเหมือนกันทุกอุณหภูมิทดสอบ และที่อุณหภูมิเดียวกันจะเห็นว่าสำหรับค่าอัตราเฉือนค่าใดค่าหนึ่งความหนืดของแป้ง โคข้าวเจ้าสุกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นในแป้ง โคดิบลดต่ำลง

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดปรากฏของแป้ง โคข้าวเจ้าสุกพบว่าช่วงแรกของการเริ่มต้นทดสอบเมื่อให้ค่าอัตราเฉือนที่ต่ำค่าความหนืดจะมีค่าสูง โดยค่าจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำเข้าสู่ค่าค่าความหนืดคงที่ค่าหนึ่ง และเป็นที่น่าสนใจที่ค่าความหนืดปรากฏต่ำสุดของแป้ง โคข้าวเจ้าทั้งสามความชื้นหรือที่ 47, 54 และ 60 %ความชื้นเปียกจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าความหนืดปรากฏต่ำสุดปรากฏในช่วงประมาณ 10-25 Pa.s

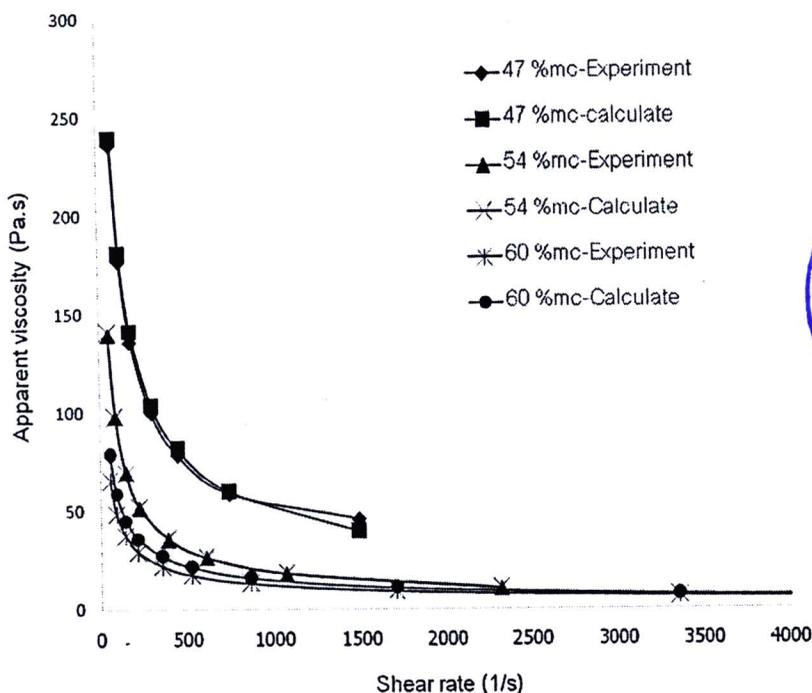
เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความร้อนต่อค่าความหนืดปรากฏที่ความชื้นตั้งต้นคงที่ค่าใดค่าหนึ่งจะเห็นว่าความหนืดปรากฏของแป้ง โคข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสจะมีค่าน้อยที่สุด และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิทำให้สุกลดลง (105 , 90 องศาเซลเซียส) เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โครงสร้างของแป้งถูกทำลายด้วยความร้อนและเกิด gelatinization ทำให้พฤติกรรมการไหลของแป้งไหลได้ง่ายขึ้น เมื่อเทียบกับความชื้นที่ต่างกันซึ่งปริมาณน้ำก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยทำให้แป้งเกิด gelatinization ซึ่งทำให้พฤติกรรมการไหลของแป้งไหลได้ง่ายขึ้นเช่นกันกับอุณหภูมิ และยังมีรายงานวิจัยว่าขนาดของเม็ดแป้งยังมีส่วนต่อความหนืดของแป้งอีกด้วย (Edwards et al., 2002)



รูปที่ 3.2 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

แบบสมการวิทยากระแสของแป้งโดข้าวเจ้า

พฤติกรรมการลดลงของค่าความหนืดของแป้งโดข้าวเจ้าสุกผกผันกับค่าอัตราเฉือนอธิบายได้จากกระบวนการอัดรีดแป้งโดขณะที่ให้ความร้อนเพื่อทำให้แป้งสุกผ่านหัวคายของเครื่อง capillary rheometer เป็นกระบวนการที่ทำให้เม็ดแป้งโดเกิดการรวมตัวแน่นมากยิ่งขึ้นพร้อมทั้งความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพกลายเป็นแป้งโดสุกภายใต้อิทธิพลของแรงกดโดยส่งผลให้ใช้ค่าแรงกดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ก่อนที่แป้งโดสุกจะไหลออกจากหัวคาย และเนื่องจากแป้งโดไม่ใช่ของเหลวการต้านทานการไหลภายใต้แรงกดอัดในช่วงแรกต้องใช้แรงในการกดอัดมาก เมื่อแป้งโดสุกไหลผ่านหัวคายออกมาทำให้การต้านทานการไหลภายใต้แรงกดอัดลดลงซึ่งความหนืดของแป้งโดทั้ง 3 ความชื้น และ 3 อุณหภูมิ อธิบายได้ดังสมการที่ (3-3), (3-4), (3-5), (3-6), (3-7), (3-8), (3-9), (3-10), และ (3-11) ทั้งนี้รูปสมการ power law ที่ใช้เป็นตัวแทนค่าความหนืดในที่นี้ไม่ได้สะท้อนว่าความหนืดมีค่าสูงไม่จำกัดเมื่ออัตราเฉือนลดลงเรื่อยๆ หากแป้งโดสุกยังไหลได้หรือยังไม่เปลี่ยนแปลงเป็นของแข็ง ดังข้อเท็จจริงที่สังเกตเห็นได้จากสภาพแป้งโดสุกที่มีลักษณะปรากฏเป็นของแข็งกึ่งหนืดหรือจัดเป็นวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นแบบหนืดขณะไหลออกจากหัวคาย ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบสมการชุดดังกล่าวนี้เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของแป้งโดในเครื่องมือแปรรูปอาหารจึงจำเป็นต้องระบุค่าความหนืดสูงสุดและต่ำสุดประกอบเสมอค่าดังกล่าวนี้รายงานไว้ด้วยแล้วในตารางที่ 3.2 ทั้งนี้เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่อง capillary rheometer ที่ไม่สามารถให้ค่าความหนืดปรากฏ

สำหรับอัตราเงินที่ต่ำกว่าหลักหน่วยแต่ให้ค่าความแม่นยำสูงในการหาค่าความหนืดปรากฏในย่านอัตราเงินสูง ค่าความหนืดปรากฏต่ำสุดจึงเป็นค่าที่วิเคราะห์ได้อย่างชัดเจนจากผลการทดสอบส่วนค่าความหนืดปรากฏสูงสุดนั้นเป็นค่าประมาณการจากค่าเฉลี่ย ณ ค่าอัตราเงินต่ำสุดที่เครื่องทดสอบรายงานผลได้

ที่ความชื้น 60%

$$\eta = 1427.96\dot{\gamma}^{(0.2730-1)} \times \exp^{(90/90)} \quad (3-3)$$

$$\eta = 1173.48\dot{\gamma}^{(0.2416-1)} \times \exp^{(105/105)} \quad (3-4)$$

$$\eta = 293.60\dot{\gamma}^{(0.4220-1)} \times \exp^{(120/120)} \quad (3-5)$$

ที่ความชื้น 54%

$$\eta = 3439\dot{\gamma}^{(0.2437-1)} \times \exp^{(90/90)} \quad (3-6)$$

$$\eta = 1643.97\dot{\gamma}^{(0.3044-1)} \times \exp^{(105/105)} \quad (3-7)$$

$$\eta = 719.32\dot{\gamma}^{(0.3296-1)} \times \exp^{(120/120)} \quad (3-8)$$

ที่ความชื้น 47%

$$\eta = 7213.01\dot{\gamma}^{(0.2438-1)} \times \exp^{(90/90)} \quad (3-9)$$

$$\eta = 7308.43\dot{\gamma}^{(0.2046-1)} \times \exp^{(105/105)} \quad (3-10)$$

$$\eta = 1148\dot{\gamma}^{(0.4020-1)} \times \exp^{(120/120)} \quad (3-11)$$

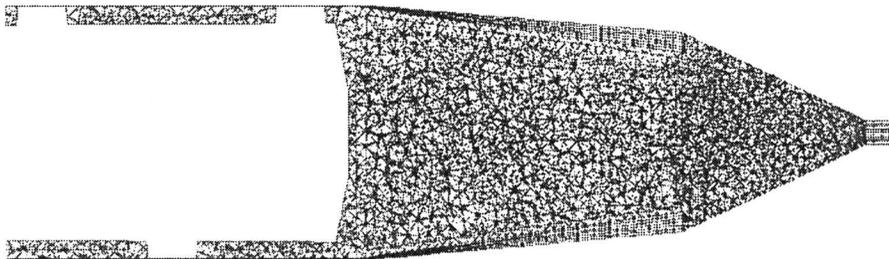
3.2 ผลการสร้าง mesh element ให้กับช่องทางการไหลของแป้งข้าวเจ้า

ภาพ mesh element ของช่องทางการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยวทั้งสามแบบสกรู (Model 1, 2, และ 3) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีมิติคงที่ให้รายละเอียดไว้แล้วในบทที่สองปรากฏผังรูปที่ 3.5-3.7 ตามลำดับ โดยแบบที่ 1 เป็นภาพ mesh element ของเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยวของเครื่อง Betol รุ่น BC32 ซึ่งเป็นเครื่องเอกซ์ทรูชันที่ถูกใช้ในการจำลองหลักเพื่อหาผลของตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้งโคข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนแบบที่ 2 และ 3 เป็นภาพ mesh element ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เปรียบเทียบผลของความลึกของช่องทางการไหล เนื่องด้วยงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตการจำลองแบบ 3D เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรไหลของแป้งโคข้างเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูชันการสร้าง mesh element สำหรับทุกแบบสกรูจึงทำครอบคลุมตลอดทั่วทั้งตัวสกรู ซึ่งมีรายละเอียดสรุปจำนวน mesh ดังปรากฏในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียด mesh element

Model	Cells	Faces	Nodes
1	859482	2238989	414052
2	939313	1947746	194605
3	734110	1526131	153748

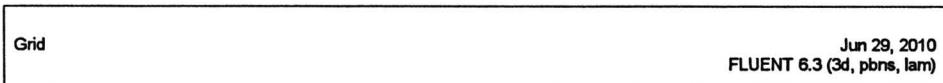
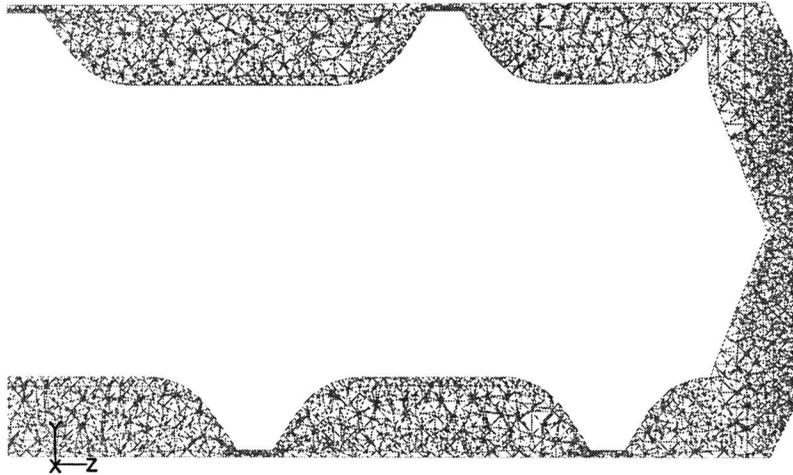
กรรมวิธีการทดสอบที่ใช้เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการสร้าง แบบ และจำนวน mesh element ได้รายงานไว้ในบทที่ 2 โดยผลการทดสอบความถูกต้องได้รายงานไว้ในหัวข้อถัดไปจากนี้ ควบคู่ไปพร้อมกันกับการแสดงถึงความถูกต้องของกรรมวิธีหรือแบบสมการที่กำหนดเลือกใช้เพื่อ การจำลองการไหลของแป็ง โค้ชัวเข้าขณะถูกแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในเครื่องเอกซ์ทราซัน



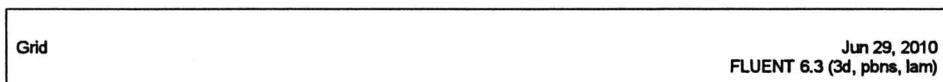
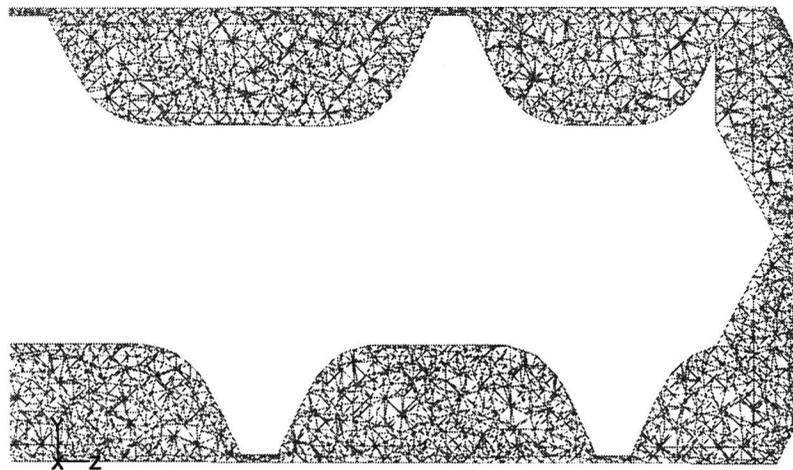
Grid

May 01, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam)

รูปที่ 3.5 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทราซัน Model 1 ณ ตำแหน่ง ปลายทางออก



รูปที่ 3.6 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซัทรูชัน Model 2 (D:H = 6) ณ ตำแหน่งปลายทางออก



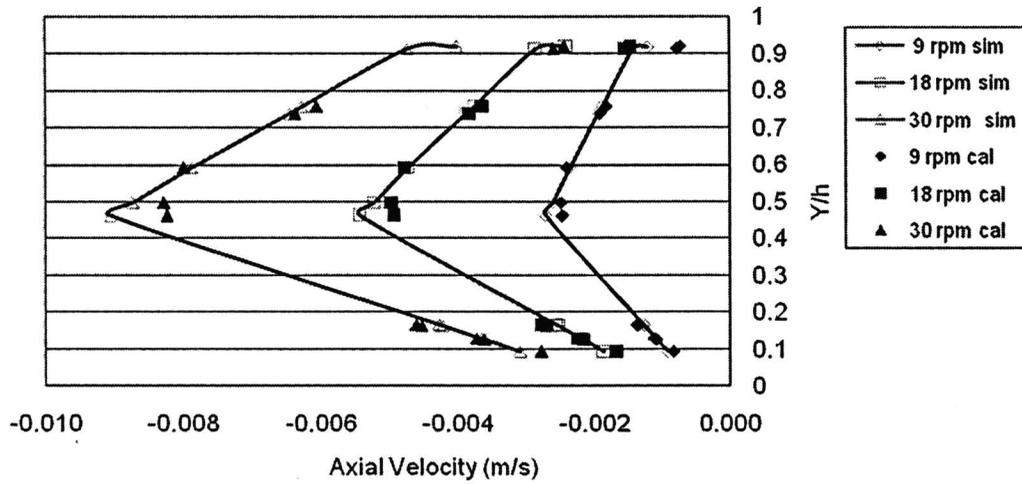
รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซัทรูชัน Model 3 (D:H = 4) ณ ตำแหน่งปลายทางออก

3.3 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีที่ใช้เพื่อการจำลองการไหล

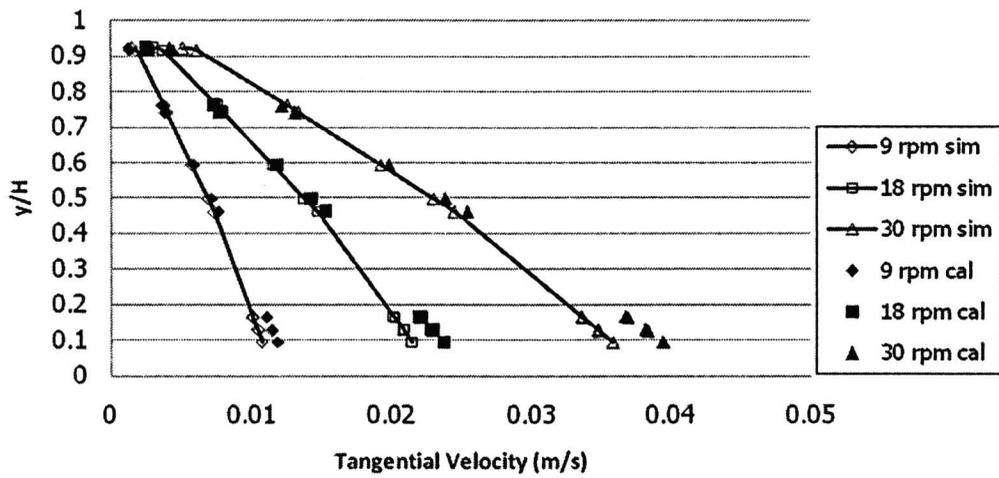
การตรวจสอบความเหมาะสมของ mesh element ที่สร้างให้กับสกรู model 1 ซึ่งเป็นสกรูที่ใช้สำหรับการจำลองหลักกระทำโดยการเปรียบเทียบค่าความเร็วของของไหลภายในเครื่องเอกซ์ทูล์รุ่นในแนว axial และค่าอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้จากผลการจำลองและผลการคำนวณด้วยการใช้สมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li and Hsieh (1995) ที่เหมาะสำหรับการไหลของของไหลชนิดนิวโทเนียนในเครื่องเอกซ์ทูล์รุ่น โดยการจำลองใช้ตัวอย่างของไหลสองชนิดคือน้ำเชื่อมข้าวโพดที่มีแบบสมการวิหยากระแสมีเหมือนกันกับที่อ้างอิงโดย Li and Hsieh (1995) ในการพิสูจน์ความถูกต้องของผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และแบ่งโคเข้าเจ้าที่ความหนืดคงตัว ผลความใกล้เคียงกันของค่าคำนวณที่ใช้ในการเปรียบเทียบดังกล่าวถูกใช้เป็นดัชนีชี้วัดความถูกต้องของ mesh element ที่สร้างให้กับช่องทางการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทูล์รุ่น และแบบสมการการจำลองที่กำหนดเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยผลการเปรียบเทียบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของน้ำเชื่อมข้าวโพด

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วเชิงเส้นแนว axial และแนว tangential ขึ้นกับตำแหน่งความห่างจากผิวสกรูถึงผิวปลอกสกรูในช่วงหนึ่งช่องทางการไหล (แสดงในรูปของค่า y/H) ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของน้ำเชื่อมข้าวโพดที่ความเร็วรอบหมุนสกรูเท่ากับ 9, 18 และ 30 รอบต่อนาทีตามลำดับถูกแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่าผลจากการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันรวมถึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆ ความเร็วรอบ โดยเฉพาะความเร็วในแนว tangential พบว่าค่าที่ได้จากสมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับค่าที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ควรที่จะระบุไว้ในที่นี้ว่า Li and Hsieh (1995) ได้ใช้ข้อมูลการทดลองวัดค่าการเพิ่มขึ้นของความดันในช่องทางการไหลของสกรูเดี่ยวที่ใช้น้ำเชื่อมข้าวโพดเป็นตัวอย่างจากงานวิจัยของ Choo (1980) พิสูจน์ให้เห็นว่าค่าอัตราการไหลที่คำนวณได้จากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันกับงานทดลองของ Choo และจากการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลพบว่าผลจากการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้ก็มีค่าใกล้เคียงกันมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าหากผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนว axial และ ความเร็วในแนว tangential ในช่องทางการไหลที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบและจำนวน mesh element รวมถึงกรรมวิธีที่กำหนดเลือกใช้ ใน โปรแกรม Fluent เพื่อการจำลองหาพฤติกรรมการไหลมีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นแบบจำลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.8 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพด ที่ความเร็วรอบหมุน 9,18 และ 30 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 40 °C



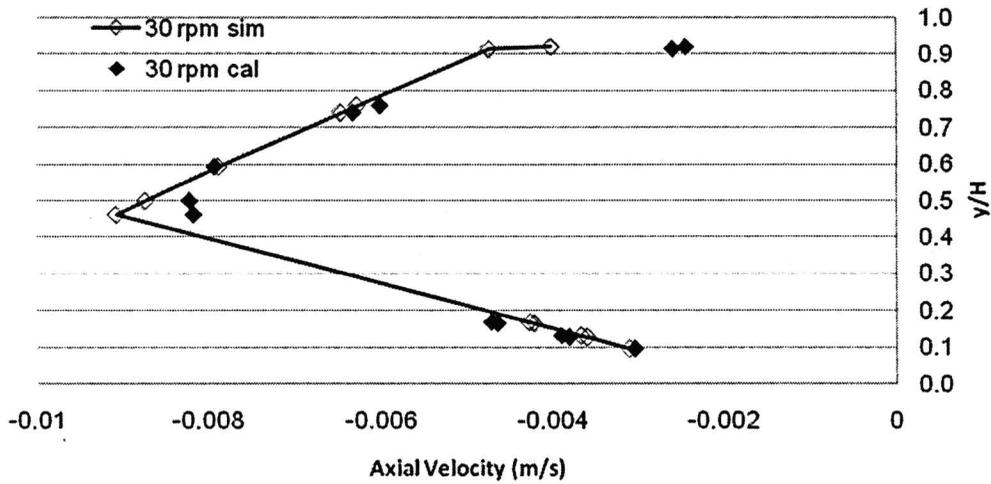
รูปที่ 3.9 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว tangential ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพดที่ความเร็วรอบหมุน 9,18 และ 30 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 40 °C

ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลที่ได้จากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพด ที่ความเร็วรอบหมุน 9,18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °C

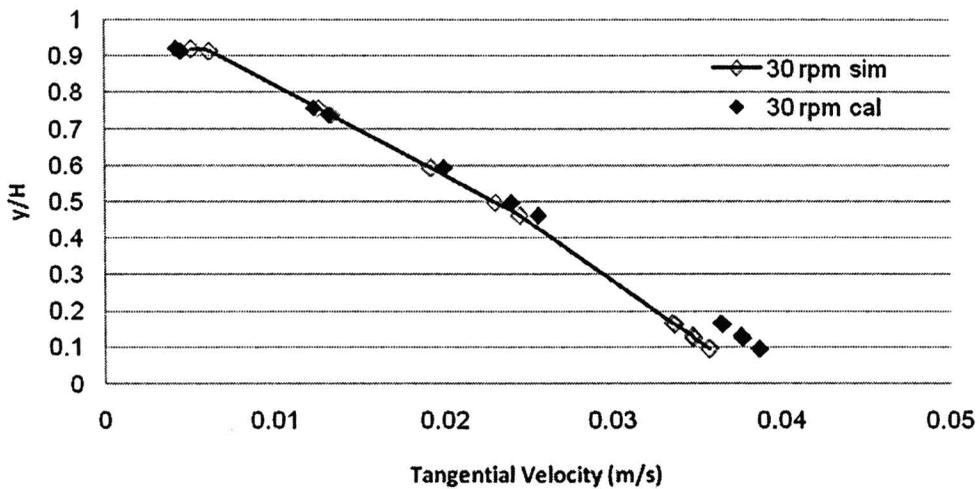
ความเร็วรอบหมุน สกรู (rpm)	ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (kg/s)	ผลการจำลอง(kg/s)	%ความแตกต่าง(%)
9	0.000733	0.000619	18.72
18	0.001466	0.001235	18.72
30	0.002444	0.002059	18.72

3.3.2 ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแปรงโคข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว

จากพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงสภาพของแปรงโคข้าวเจ้าเกิดขึ้นจากความร้อนในเครื่องเอกซ์ทรูชัน พบว่ากระบวนการแปรรูปแปรงให้แปรงโคสุกนี้ส่งผลให้การต้านทานการไหลหรือการเปลี่ยนรูปของแปรงโคระหว่างที่ถูกทำให้สุกนี้จัดเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนซึ่งโดยทั่วไปแล้วความหนืดจะมีค่าไม่คงตัวหากแต่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน และในกรณีของแปรงโคข้าวเจ้ายังจัดเป็นวัสดุในกลุ่มที่ความหนืดปรากฏมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้น (shear thinning model) เพื่อทดสอบความเหมาะสมของกรรมวิธีที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองจึงกำหนดให้แปรงโคข้าวเจ้ามีค่าความหนืดคงตัวในช่วงค่าสูงซึ่งมักเป็นอุปสรรคของการจำลองในหลายกรณีศึกษาวิจัยอื่นที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้แปรงโคข้าวเจ้าที่ถูกอัดตัวและทำให้สุกในเครื่องเอกซ์ทรูชันจะมีค่าความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจำนวนเซลล์หรือ mesh element ที่สร้างขึ้น และกรรมวิธีจำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูชันจำเป็นต้องติดตามพฤติกรรมการไหลที่ค่าความหนืดสูงได้ การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนว axial และ แนว tangential ในช่องทางไหลที่ได้ ระหว่างผลการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแปรงโคข้าวเจ้าที่กำหนดให้มีความหนืดคงที่พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนค่ามีความใกล้เคียงกันคล้ายในกรณีของน้ำเชื่อมข้าวโพดดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ ส่วนผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของแปรงโคข้าวเจ้าที่กำหนดให้มีความหนืดคงที่ระหว่างผลการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์พบว่ามีความแตกต่างประมาณ 15 % ดังแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.10 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแปรงโด้ข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัวที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.11 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว tangential ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแปรงโด้ข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัวที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแปรงโด้ข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัวที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที

ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (kg/s)	ผลจากการจำลอง(kg/s)	%ความแตกต่าง(%)
0.002055	0.001777	15.34

จากผลการเปรียบเทียบสามารถยืนยันได้ว่าจำนวนเซลล์รวมถึงคุณภาพของเซลล์ที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลภายในเครื่องเอกซทรวงูชั้นชนิดสกรูเดี่ยว model 1 สามารถติดตามพฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนซึ่งมีความหนืดในย่านค่าต่ำ และของไหลแบบนอนนิวโทเนียนซึ่งมีความหนืดในย่านค่าสูง ผลการใช้วิธีการจำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของแป้งโดข้าวเจ้าที่มีความหนืดคงแบบสมการ power law ที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.1.2 ในเครื่องเอกซทรวงูชั้นทั้งสามแบบสกรูซึ่งใช้เทคนิคการสร้าง mesh แบบเดียวกันกับที่ใช้ในแบบสกรู model 1 ที่ผ่านการยืนยันความถูกต้องดังกล่าวมาแล้วนั้นมีรายละเอียดคงหัวข้อถัดไป

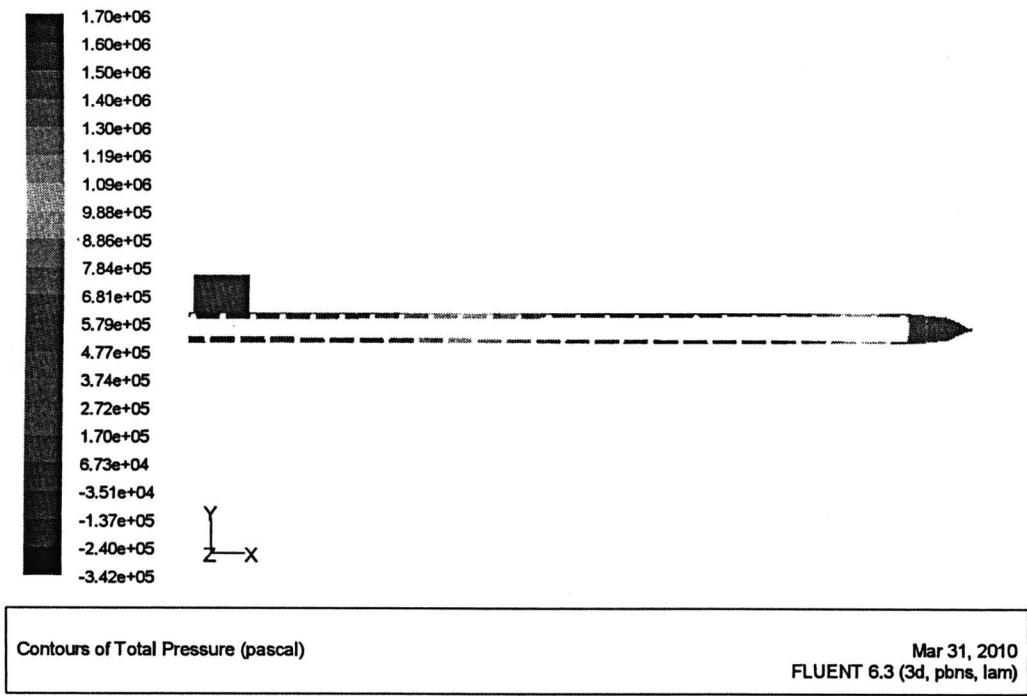
3.4 ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งข้าวเจ้าในเครื่องเอกซทรวงูชั้น

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโดข้าวเจ้าให้กับสกรู model 1 ประกอบไปด้วยการศึกษาถึงผลของความชื้นของแป้งโด ความเร็วรอบหมุนสกรู และความร้อนหรืออุณหภูมิแปรรูปที่มีต่อค่าความดันในเนื้อมวลของแป้งโดข้าวเจ้า ความเร็ว อัตราเฉือน และอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ โดยการจำลองการไหลเป็นแบบอุณหภูมิคงตัว (Isothermal) และเป็นสภาวะการไหลแบบไม่อัดตัวตลอดความยาวสกรู นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูต่อความลึกของช่องทางการไหล (D:H ratio) โดยใช้แบบสกรู model 2 และ model 3 ผลการจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 ความดันที่ปรากฏในเนื้อแป้งข้าวเจ้า

ความดันเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิต เนื่องจากเป็นดัชนีบ่งบอกได้ว่าแป้งข้าวเจ้าที่ถูกอัดตัวผ่านหัวคायมีคุณลักษณะอย่างไรซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพของตัวผลิตภัณฑ์ทั้งในแง่สภาพความสุก และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลและอัดตัวของแป้งโดข้าวเจ้าที่หลายความชื้นตั้งต้นในวัตถุดิบแตกต่างกันสามระดับ ได้แก่ 47, 54 และ 60 % ความชื้นเปียก โดยแต่ละความชื้นยังทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแปรรูปที่ 90, 105 และ 120 °C และความเร็วรอบหมุนของสกรูที่ 10, 20, 30 และ 40 รอบต่อนาทีว่ามีผลต่อความดัน ภาพตัวอย่างผลการจำลองค่าความดันของการไหลและอัดตัวของแป้งโดข้าวเจ้าในเครื่องเอกซทรวงูชั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 3.12 ที่ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส %ความชื้น 54 %ความชื้นเปียก พบว่าความดันในเนื้อของแป้งโดข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งตัวส่งวัสดุจนกระทั่งถึงกลางตัวสกรูความดันจะมีค่าสูงสุด จากนั้นความดันจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศที่ปลายทางออกของหัวคायซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความดันลักษณะนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของความดันย้อนกลับอันเกิดจากการต้านทานการไหลออกของผลิตภัณฑ์โดยหัวคायส่วนผลอุณหภูมิแปรรูป และความเร็วรอบหมุนสกรูที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของแต่ละ

ความชื้นดั้งเดิม สรุปรูปข้อมูลไว้ใน ตารางที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าความลึกของช่องทางกรไหลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันด้วยดังมีรายละเอียดในหัวข้อเรื่องผลของมิติของสกรู



รูปที่ 3.12 แสดงผลการจำลองความดันที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งโดข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีดโดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน

ตารางที่ 3.6 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวคายใกล้ทางออกแป้งข้าวเจ้าความชื้น 47 %

Screw speed (rpm)	Pressure near die exit area (Pa)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	1050290	907906	330932
20	1240510	1046230	437288
30	1367430	1136740	514727
40	1465450	1205660	515099

ตารางที่ 3.7 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวดายใกล้ทางออกแปรงข้าวเจ้าความชื้น 54 %

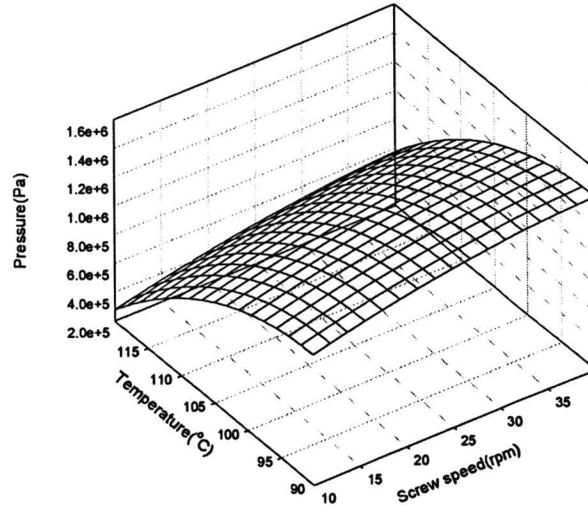
Screw speed (rpm)	Pressure near die exit area (Pa)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	500557	309788	151062
20	591188	382568	189847
30	651646	432848	217013
40	698348	472488	238627

ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวดายใกล้ทางออกแปรงข้าวเจ้าความชื้น 60 %

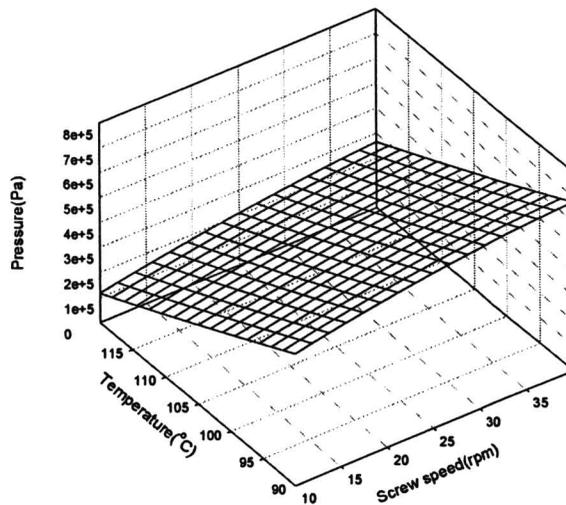
Screw speed(rpm)	Pressure near die exit area (Pa)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	234957	169677	92435
20	283187	200621	123857
30	315898	221287	146994
40	341415	237238	166000

พิจารณาข้อมูลค่าความดันที่ปรากฏในตารางที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการจำลองของแปรงข้าวเจ้าที่ความชื้น 47, 54 และ 60 % ความชื้นเปียกตามลำดับ พบว่าค่าความดันแปรผันกับความเร็วรอบหมุน (Wang et al., 2004) กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบหมุนให้มีความดันมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันพบว่าความดันแปรผกผันกับอุณหภูมิและความชื้น (Singh et al., 1997) โดยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและความชื้นให้มีความสูงความดันกลับมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากแปรงข้าวเจ้าที่มีความชื้นมากพอเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างของแป้งโคข้าวเจ้าดิบจะเปลี่ยนสภาพเป็นสุกหรือเกิด gelatinization และขณะที่ตัวอย่างที่มีความชื้นมากกว่าแป้งโคสุกจะมีความหนืดต่ำลงส่งผลให้สภาวะดังกล่าวไหลได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภายในตัวอย่างแป้งโคดิบที่มีความชื้นตั้งต้นเท่ากันพบว่าความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ

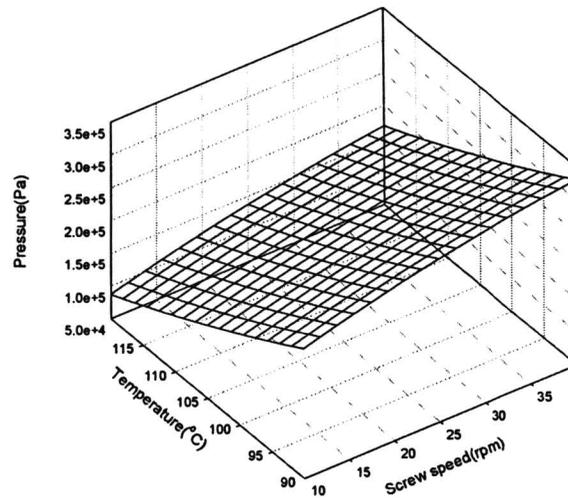
หมุนและอุณหภูมิแปรรูปที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของแต่ละความชื้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการพื้นผิวแบบพาราโบลอยด์เช่นกันดังภาพที่ปรากฏในรูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15 สำหรับความชื้น 47%, 54%, และ 60% ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 47% ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.14 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 54% ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.15 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 60 %ความชื้นเปียก

เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันที่ปรากฏในช่องทางกรไหลเป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันของหัวคาย ความเร็วรอบหมุน และความร้อนที่จ่ายให้ในกระบวนการแปรรูปมีผลต่อระยะเวลาที่แป้งโดปรากฏอยู่ในเครื่อง โดยตรงและมีผลต่อรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยหัวคาย ค่าความดันจึงมีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก กล่าวคือ ทั้งการสุกของแป้งโดและรูปทรงของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งชนิดใดย่อมมีค่าความดันที่เหมาะสมต่ออัตรากรไหลของผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพคงที่ รูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15 สามารถประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าของเงื่อนไขเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิต และเอื้อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้รูปดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรให้มีความสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม โดยอาศัยค่าความดันที่เหมาะสมสำหรับคงคุณภาพผลิตภัณฑ์นั้นๆประกอบเป็นเกณฑ์ ตัวอย่างเช่นการปรับค่าอุณหภูมิแปรรูปและความเร็วรอบหมุนสกรูให้สัมพันธ์กันเพื่อให้ได้ความดันตามที่ต้องการ และเพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานสมการพื้นผิวแบบพารา โบลอยด์ $P(N,T)$ ที่สอดคล้องกันกับภาพความสัมพันธ์พื้นผิวแสดงผลของความเร็วรอบหมุนสกรูและอุณหภูมิแปรรูปต่อความดันของแป้งโดสุกภายในช่องทางไหลบริเวณใกล้ทางออกสำหรับแต่ละความชื้นที่แสดงไว้ในรูป 3.13, 3.14 และ 3.15 จึงได้ให้ไว้ด้วยดังต่อไปนี้

ความชื้น 47 %ความชื้นเปียก

$$P = -6613268.16 + 21103.2067N + 167276.7499T - 222.99N^2 - 928.5256T^2 \quad (3-12)$$

ความชื้น 54 %ความชื้นเปียก

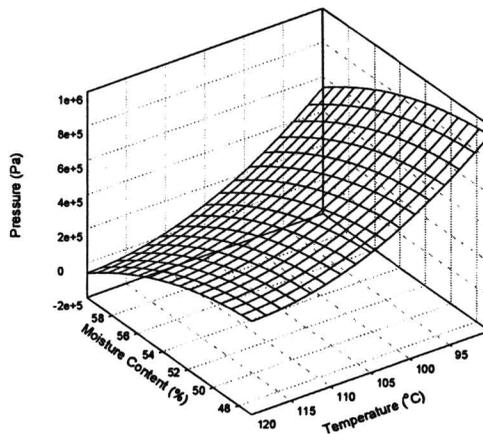
$$P = 1938978.5955 + 8866.9068N - 18715.3836T - 78.5333N^2 + 23.8356T^2 \quad (3-13)$$

ความชื้น 60 %ความชื้นเปียก

$$P = 971918.7232 + 4819.2984N - 10879.41856T - 41.7683N^2 + 26.1651T^2 \quad (3-14)$$

โดย P = ความดัน (Pa), N = ความเร็วรอบหมุนสกรู (rpm), T = อุณหภูมิ (°C)

นอกจากอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนที่มีผลต่อความดันแล้ว ความชื้นตั้งต้นของแป้งโดดิบยังเป็นอีกปัจจัยหลักที่มีผลต่อความดัน ผลการจำลองพบว่าเมื่อให้ความเร็วรอบหมุนและอุณหภูมิคงที่ค่าชุดหนึ่งชุดใดความดันแปรผกผันกับความชื้น กล่าวคือเมื่อค่าความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นความดันจะมีค่าลดลง (Singh et al., 1997) ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 รอบต่อนาที ทั้งนี้ลักษณะความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อความดันยังขึ้นกับความเร็วรอบหมุนสกรูด้วย สมการความสัมพันธ์ของแต่ละความเร็วรอบเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

ความเร็วรอบหมุน 10 รอบต่อนาที

$$P = \left(\begin{array}{l} 5419586.3841 + 184506.5245MC - 154215.8029T - 2014.6488MC^2 \\ + 639.5430T^2 \end{array} \right) \quad (3-15)$$

ความเร็วรอบหมุน 20 รอบต่อนาที

$$P = \left(\begin{array}{l} 7337941.8279 + 176428.4820MC - 179768.7254T - 1975.7019MC^2 \\ + 744.0647T^2 \end{array} \right) \quad (3-16)$$

ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาที

$$P = \left(\begin{array}{l} 8746609.0163 + 166496.2600MC - 197062.0661T - 1905.0070MC^2 \\ + 814.8607T^2 \end{array} \right) \quad (3-17)$$

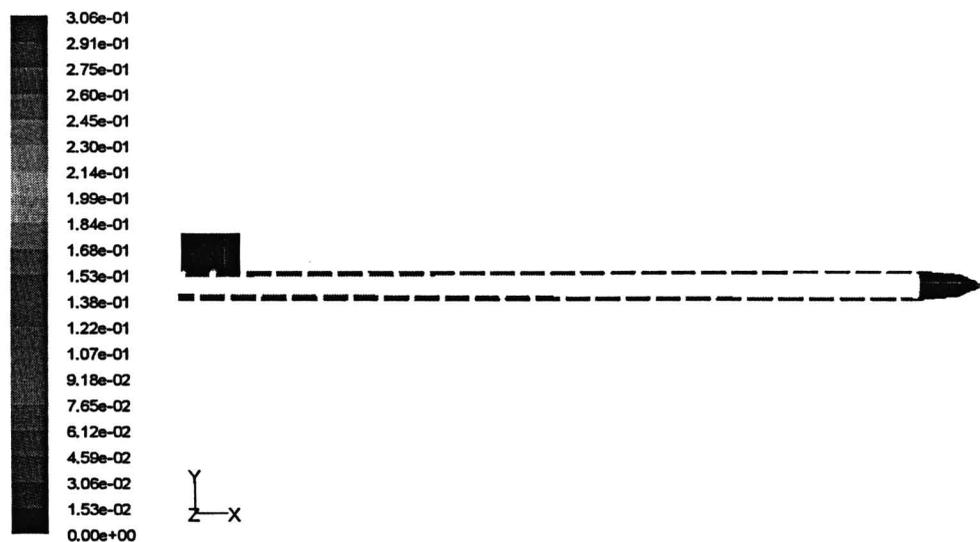
ความเร็วรอบหมุน 40 รอบต่อนาที

$$P = \left(\begin{array}{l} 8645265.6063 + 183449.4379MC - 200096.2218T - 2094.4201MC^2 \\ + 823.6563T^2 \end{array} \right) \quad (3-18)$$

โดย MC = ความชื้นของแป้ง โค้ข้าวเจ้าดิบ (% แบบเปียก), T = อุณหภูมิ (°C)

3.4.2 ความเร็วและอัตราเฉือนที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า

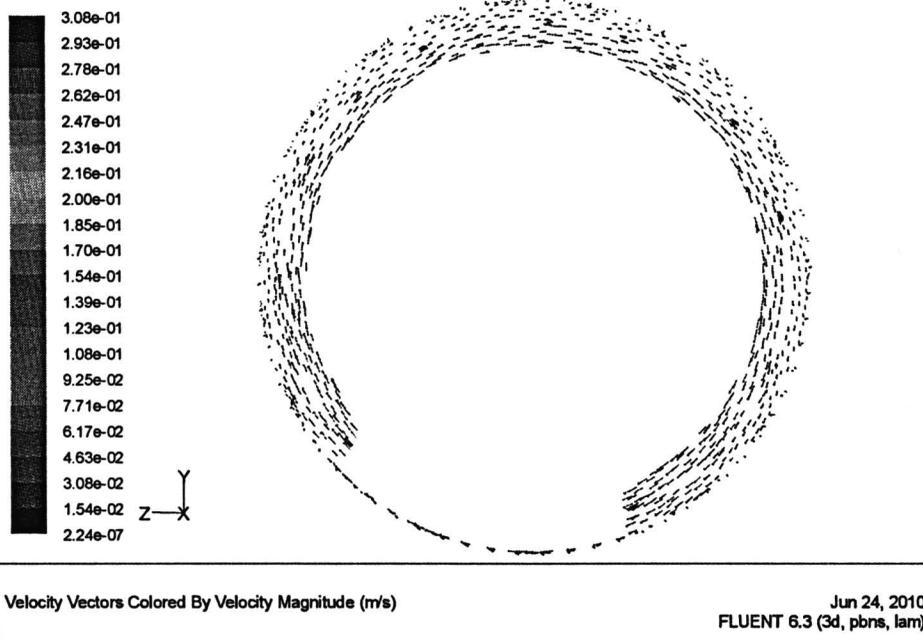
ภาพตัวอย่างการจำลองความเร็วที่ปรากฏในเนื้อมวลของแป้งข้าวเจ้าในกระบวนการไหล และอัตราที่ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาทีอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่%ความชื้น 54 % ความชื้นเปียก แสดงในรูปที่ 3.17 ผลการจำลองพบว่าความเร็วที่ผิวของสกรูมีค่าสูงกว่าที่ผิวของ ปลอกเครื่องเอกซ์ทราซันและความเร็วมีค่าสูงสุดที่ปลายทางออกของหัวคายน ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นถึงความเร็วของการไหลที่สม่ำเสมอ บ่งชี้ว่าแป้งข้าวเจ้าที่ถูกอัดรีดภายในเครื่องเอกซ์ทราซันได้รับการอัดรีดอย่างสม่ำเสมอ



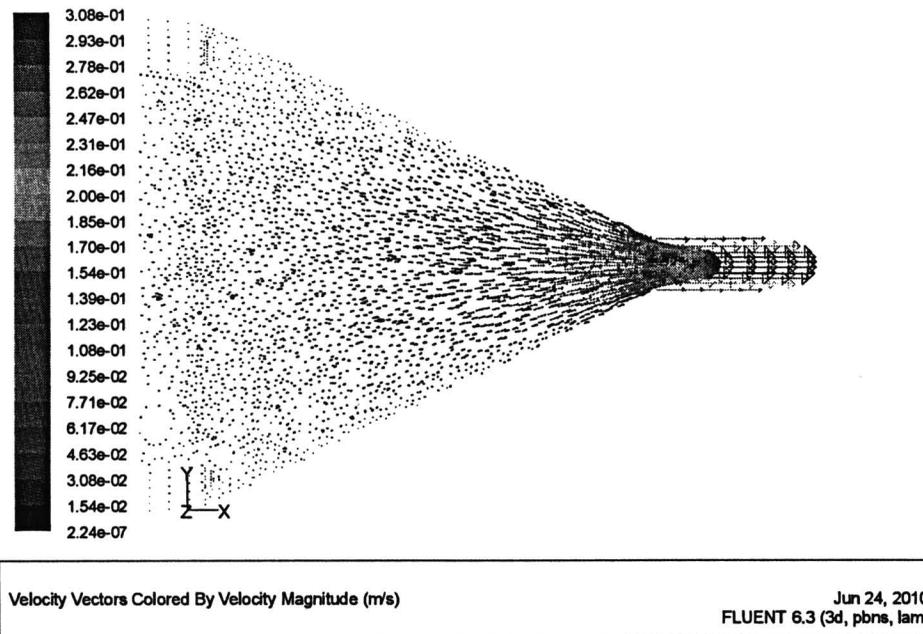
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Mar 31, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam)

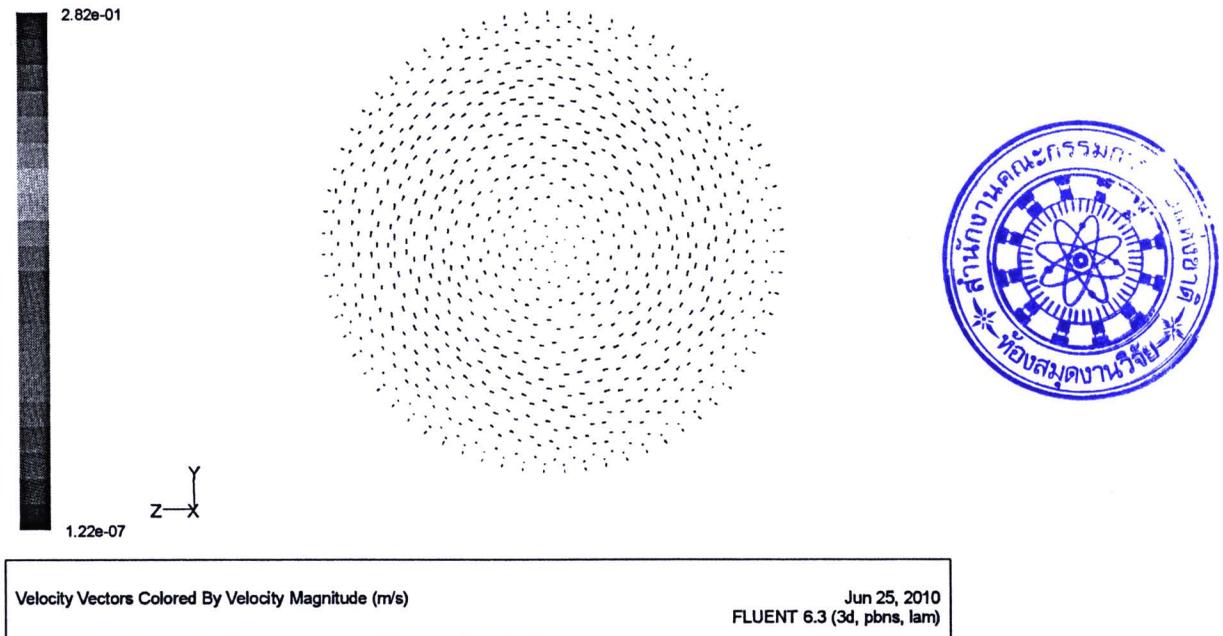
รูปที่ 3.17 แสดงผลการจำลองความเร็วที่ปรากฏในเนื้อของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีดโดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทราซัน



รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่ง 0.2027 m วัตจากตำแหน่งปลายทางออกหัวดาบ



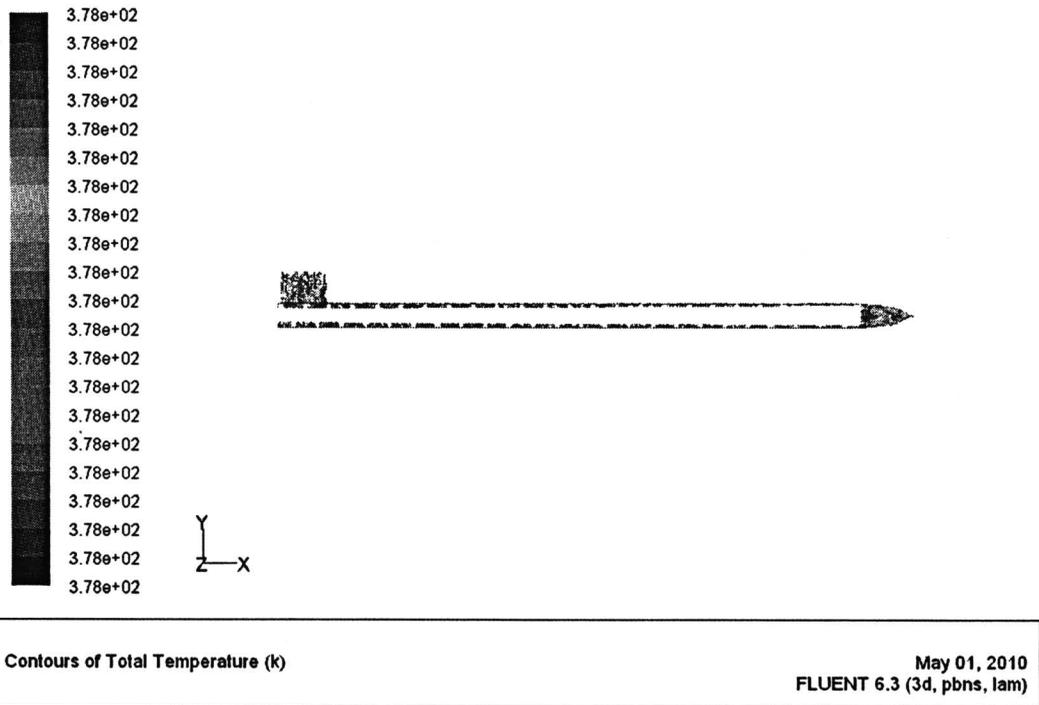
รูปที่ 3.19 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทางออกของหัวดาบ



รูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทางออกของหัวคายในลักษณะตัดขวางตัวสกรู

3.4.3 อุณหภูมิที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า

ภาพตัวอย่างการจำลองการกระจายตัวของความร้อนในเนื้อมวลของแป้งข้าวเจ้าในกระบวนการอัดตัวที่ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่%ความชื้น 54 %ความชื้นเปียกถูกแสดงในค่าของอุณหภูมิดังรูปที่ 3.21 เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการไหลในสภาวะแบบอุณหภูมิคงตัว (isothermal) ผลการจำลองพบว่าอุณหภูมิในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้ามีความสม่ำเสมอและมีค่าแกว่งในย่านอุณหภูมิแปรรูปแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะดังกล่าวความเค้นมีผลต่อการเพิ่มค่าความร้อนในเนื้อมวลของแป้งโดโดยรวมขณะถูกแปรรูปไม่มากนัก



รูปที่ 3.21 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิที่ปรากฏในเนื้อของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีดโดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน

3.4.4 อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปกติถูกใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงขีดความสามารถในการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง แต่สำหรับกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องเอกซ์ทรูชันเป็นเครื่องจักรในการผลิตแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์และความดันภายในหัวดาบบริเวณใกล้ทางออกยังถูกใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความคล้ายคลึงกันของคุณภาพตัวผลิตภัณฑ์ได้ด้วย กล่าวคือ อัตราส่วนค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ต่อความดันบ่งบอกถึงความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์นั้นได้ ซึ่งความหนาแน่นส่งผลถึงลักษณะรูปทรงของตัวผลิตภัณฑ์โดยตรง ดังนั้นโดยปกติหากต้องการได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคล้ายคลึงกันผู้ปฏิบัติงานมักปรับแต่งค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ อัตราส่วนของค่าดังกล่าวอยู่ในย่านเหมาะสมสำหรับอัตราการผลิตที่ต้องการ ตารางที่ 3.9, 3.10 และ 3.11 แสดงผลการคำนวณอัตราการผลิตเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ที่ได้จากแป้ง โคข้าวเจ้าดิบความชื้น 47, 54 และ 60 %ความชื้นเปียกตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 47%

Screw speed (rpm)	Mass flow rate at die exit (kg/s)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	0.000539275	0.000538956	0.000573397
20	0.001077463	0.001077916	0.001146797
30	0.001615043	0.001616874	0.001720188
40	0.00215230	0.00217210	0.002293579

ตารางที่ 3.10 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 54%

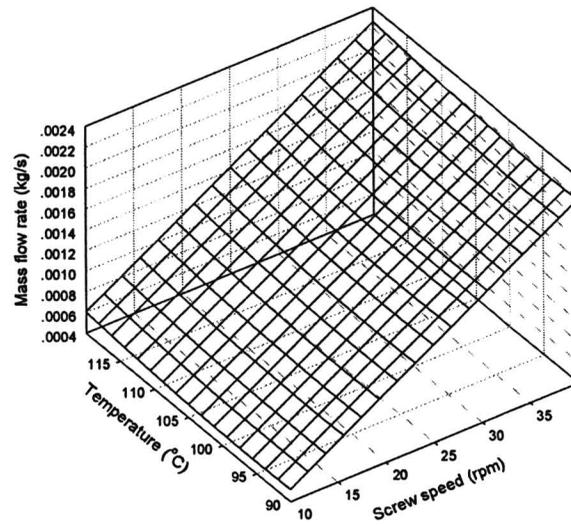
Screw speed (rpm)	Mass flow rate at die exit (kg/s)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	0.00051602	0.000546243	0.000557931
20	0.001030961	0.001092485	0.00111586
30	0.001545221	0.001638726	0.001673783
40	0.002059175	0.00218497	0.002231699

ตารางที่ 3.11 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโคข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %

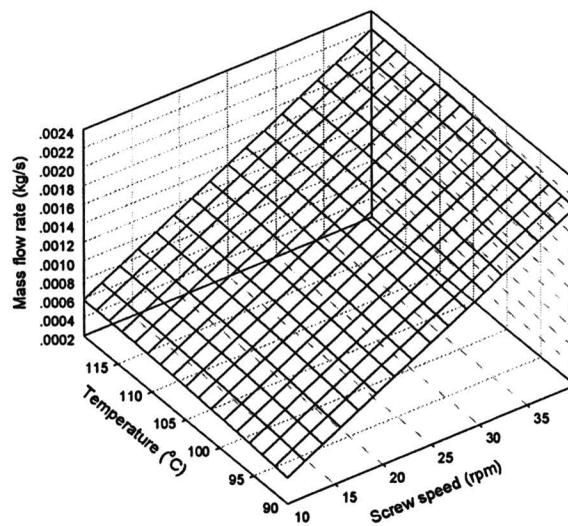
Screw speed (rpm)	Mass flow rate at die exit (kg/s)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	0.000509567	0.000534132	0.000589679
20	0.001019092	0.00106717	0.001179351
30	0.001528648	0.001599629	0.001769015
40	0.002038204	0.002131711	0.002358666

จากตารางที่ 3.9, 3.10 และ 3.11 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกอัดผ่านเครื่องเอกซ์ทรูชันของช่วงความชื้น 47-60% ณ ความเร็วรอบสกรูเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องด้วยปริมาณความชื้นที่ใช้ทดสอบจัดว่าอยู่ในช่วงความชื้นที่สูงกว่ากระบวนการแปรรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันทั่วไป (การกำหนดค่าช่วงความชื้นทดสอบในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านเครื่องเอกซ์ทรูชันที่ปราศจากระบบเติมน้ำส่งผลให้ต้องปรับสภาพความชื้นแป้งดิบสูงกว่าปกติ) ค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์จากผลการจำลองที่ทุกความชื้นมีค่าแปรผันตามกับความเร็วรอบและอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและอุณหภูมิให้มีค่าสูงขึ้นอัตราการไหลเชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้อธิบายได้จากค่าความเร็วของผลิตภัณฑ์ขณะไหลออกจากหัวคายที่แปรเปลี่ยนภายใต้อิทธิพลของค่าความดันบริเวณใกล้ทางออกของหัวคายอันเป็นผลของความดันย้อนกลับที่หัวคายกระทำต่อเนื้อวัตถุดิบต่างสภาพกันดังกล่าวไว้ในหัวข้อก่อน

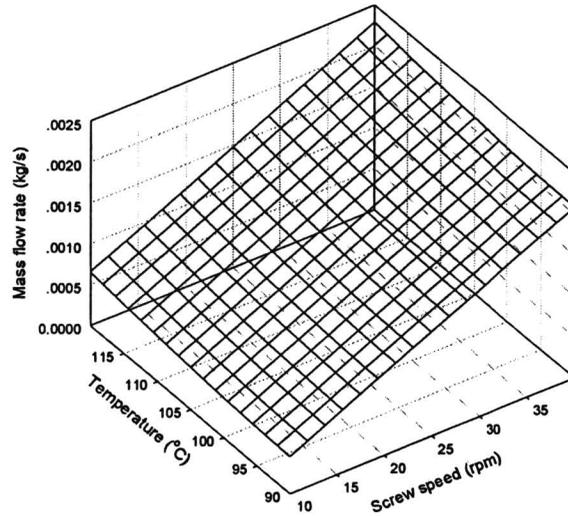
รูปที่ 3.22, 3.23 และ 3.24 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์แป้งโคข้าวเจ้าที่ความชื้น 47, 54 และ 60 % ความชื้นเปียกตามลำดับ



รูปที่ 3.22 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวลของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 47% ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.23 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวลของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 54% ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.24 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวลของโคแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %ความชื้นเปียก

เพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้ประโยชน์ รูปที่ 3.22, 3.23 และ 3.24 สำหรับหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนที่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลตามที่ต้องการ สมการความสัมพันธ์พื้นผิวของค่าอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโคแป้งข้าวเจ้าของทั้งสามความชื้นถูกแสดงไว้สมการที่ (3-19), (3-20) และ (3-21) ตามลำดับ

แป้งข้าวเจ้าความชื้น 47 %ความชื้นเปียก

$$\dot{m} = 0.0015 + (5.4525 \times 10^{-5} \times N) - (3.2825 \times 10^{-5} \times T) + (1.2771 \times 10^{-8} \times N^2) + (1.7020 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (3-19)$$

แป้งข้าวเจ้าความชื้น 54 %ความชื้นเปียก

$$\dot{m} = -0.0015 + (5.3993 \times 10^{-5} \times N) + (2.6222 \times 10^{-5} \times T) - (8.3065 \times 10^{-10} \times N^2) - (1.0789 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (3-20)$$

แป้งข้าวเจ้าความชื้น 60 %ความชื้นเปียก

$$\dot{m} = 0.0013 + (5.4430 \times 10^{-5} \times N) - (3.1466 \times 10^{-5} \times T) - (7.8966 \times 10^{-10} \times N^2) + (1.8163 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (3-21)$$

โดย \dot{m} = อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ (kg/s), N = ความเร็วรอบหมุนสกรู (rpm) และ T = อุณหภูมิ (°C)

การประยุกต์ใช้สมการ (3-19), (3-20) และ (3-21) อาจให้ค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์คลาดเคลื่อนจากสภาวะการผลิตจริง ทั้งนี้เป็นผลมาจากความจริงที่พบว่าผลการจำลองที่แสดงถึง

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ปรากฏในรูปของความเร็วย้อนและอุณหภูมิคงตัวของกระบวนการผลิตที่มีต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่จากการกระบวนการทดสอบจริงที่ทำในงานวิจัยนี้ เนื่องมาจากข้อจำกัดของวิธีการจำลองพฤติกรรมการไหลทั้งแบบการจำลองเชิงตัวเลขและการใช้สมการเชิงวิเคราะห์ที่มี ณ ขณะนี้ยังไม่สามารถใช้ประมาณค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปแปงซึ่งมีพฤติกรรมการอัดตัวได้เกิดขึ้นขณะถูกทำให้สุกหรือแปรรูปด้วยความร้อน ค่าอธิบายถึงปัญหาความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการจำลองได้กล่าว โดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.4.5 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง

จากผลการยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีการจำลองพฤติกรรมการไหลในเครื่องเอกซ์ทอร์ชันของน้ำเชื่อมข้าวโพดซึ่งเป็นของไหลประเภทนิวโทเนียนที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้พบว่าผลของอิทธิพลของความเร็วย้อนหรือความดันที่มีต่ออัตราการไหลที่จำลองได้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ซึ่งผลดังกล่าวนี้ให้ความสอดคล้องกันกับที่ Li and Hsieh (1995) รายงานว่าผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่นำมาจากข้อมูลอ้างอิงของคณะนักวิจัย Choo (Li et al., 1994 ; Choo et al., 1980) แม้ว่ามิติของสกรูที่ใช้ในสองงานดังกล่าวแตกต่างกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลในเครื่องเอกซ์ทอร์ชันของแป้งโดข้าวเจ้าที่จัดเป็นของไหลประเภทนอนนิวโทเนียนหรือเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางวิทยากระแสเป็นแบบยืดหยุ่นแบบหนืดอาจมีผลต่อความถูกต้องของผลการจำลองก็เป็นได้ และแม้ว่างานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่าในกรณีที่มีการจำลองทำโดยสมมติให้ความหนืดของแป้งโดมีค่าคงที่ให้ค่าอิทธิพลของความเร็วย้อนหรือความดันที่มีต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่จำลองได้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับกรณีของน้ำเชื่อมข้าวโพด เนื่องมาจากว่าลักษณะทางกายภาพของแป้งโดข้าวเจ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาระหว่างกระบวนการแปรรูปให้สุกด้วยความร้อนด้วยเครื่องเอกซ์ทอร์ชัน และวัตถุดิบแป้งที่มีลักษณะเป็นเม็ดผงที่อัดตัวได้แตกต่างจากน้ำเชื่อมข้าวโพดที่เป็นของเหลวหนืดที่ไม่เกิดการอัดตัวภายใต้สภาวะการผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทอร์ชัน ดังจะสังเกตได้จากความแตกต่างของเอกซ์ทอร์คเททหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงกับวัตถุดิบแป้ง

ดังนั้นเพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงความถูกต้องของผลการจำลองที่มีต่อการใช้ทำนายการไหลระหว่างกระบวนการแปรรูปแปงโดด้วยเครื่องเอกซ์ทอร์ชัน โดยเฉพาะกับผลของความดันที่มีต่ออัตราการผลิตหรืออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลทดลองผลิตจริงเปรียบเทียบกับทั้งผลการจำลอง และผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิด power law ตามแบบสมการของ Rauwendaal (2001) ซึ่งผลที่ได้ของค่าความเร็วย้อน ความดันและอัตราการไหล

เชิงมวลของผลิตภัณฑ์สำหรับกระบวนการแปรรูปแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 54% และ 40% (ความชื้นเปียก) และอุณหภูมิผลิตเป็น 105 °C แสดงในตารางที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.12 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแป้งโคความชื้น 54 %

ความเร็ว รอบหมุน (rpm)	ความดันภายในหัวคายน ตำแหน่งใกล้ทางออก (Pa)		ค่าความ คลาดเคลื่อน ของความดัน (%)	อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ (kg/s)		
	ผลการ ทดลอง*	ผลการ จำลอง		ผลการ ทดลอง	ผลการ จำลอง	ผลเฉลยเชิง วิเคราะห์**
	10	419275		309788	26.11	0.00018
20	489155	382568	21.79	0.00030	0.00109	0.00135
30	489155	432848	11.51	0.00050	0.00164	0.00202
40	668814	472488	29.35	0.00088	0.00218	0.00269

* ค่าความผิดพลาดเท่ากับ ± 68948 Pa หรือ ± 10 Psi, ** สมการผลเฉลยโดย Li และ Hsieh

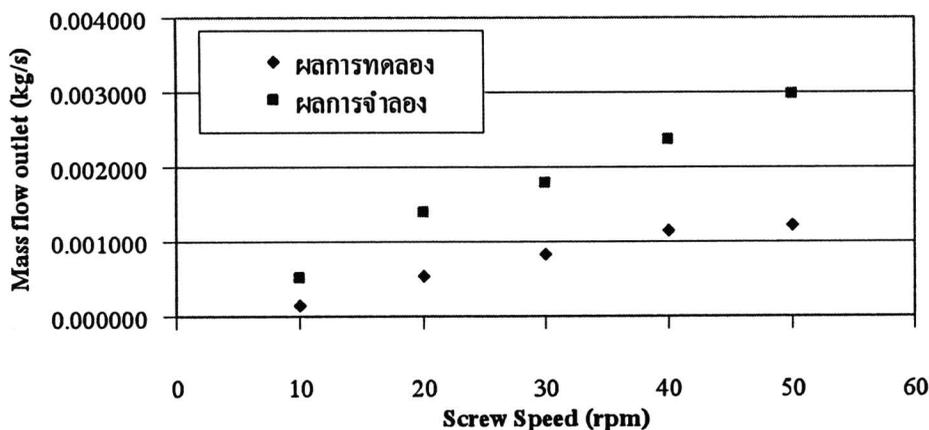
ตารางที่ 3.13 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแป้งโคความชื้น 40%

ความเร็วรอบหมุน (rpm)	ความดันภายในหัวคายน ตำแหน่ง ไกล่ทางออก (Pa)		ค่าความคลาดเคลื่อนของความดัน (%)	อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ (kg/s)	
	ผลการทดลอง	ผลการจำลอง		ผลการทดลอง	ผลการจำลอง
20	1424917	914903	55.75	0.000533	0.00137986
30	1516847	1093160	38.76	0.000833	0.0017819
40	1516847	1240350	22.29	0.001150	0.00237586
50	1608777	1368050	14.96	0.001228	0.00296982

* ค่าความผิดพลาดเท่ากับ ± 68948 Pa หรือ ± 10 Psi

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วยรอบหมุนสกรูที่มีต่อความดันภายในหัวคายน ตำแหน่ง ไกล่ทางออก และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ (อัตราการไหลออก) สำหรับตัวอย่างสภาวะการผลิตที่ใช้แป้งโคความชื้น 54% และ 40% อุณหภูมิผลิตคงตัว 105 °C ดังที่ปรากฏในตารางที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ พบว่าทั้งสองกรณีทดลองให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่าในทุกความเร็วรอบหมุนที่ทดสอบผลการจำลองค่าความดันภายในหัวคายน ตำแหน่ง ไกล่ทางออกมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการวัดจริงในตำแหน่งเดียวกัน (ที่กัคตำแหน่งแสดงไว้ในบทที่ 2) ในขณะที่ผลการจำลองค่าอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ในทุกความเร็วรอบหมุนให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดลองวัดอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จริงค่อนข้างสูงมากดังตัวอย่างภาพของกรณีแป้งโค 40% ที่ปรากฏในรูปที่ 3.25 ผลการเปรียบเทียบที่ได้นี้แตกต่างจากการเปรียบเทียบอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ โดยใช้แบบสมการ Li and Hsieh (1995) ที่ให้ค่าความแตกต่างกันไม่มาก ค่าความแตกต่างของทั้งผลการจำลองหรือผลการคำนวณโดยใช้สมการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลการวัดจริงมีสาเหตุหลักจากข้อจำกัดของการจำลองพฤติกรรมการไหลโดยโปรแกรม

คำนวณทางพลศาสตร์ของไหลอันเป็นผลจากระบบสมการ โครงสร้างวัสดุที่จำเป็นมากต่อการคำนวณเชิงตัวเลขและการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ได้แก่ แบบสมการวิทยากระแส และแบบสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความดันหรือความเค้นสำหรับแป้งโดที่ถูกแปรรูประหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่ากรรมวิธีการจำลองที่มีในขณะนี้เพื่อใช้ติดตามพฤติกรรมการไหลของแป้งโดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีข้อจำกัดอยู่เฉพาะการใช้ติดตามได้เพียงโซนหรือช่องทางไหลช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุซึ่งอาจเป็นได้เฉพาะในย่านตวงวัด (metering zone) เนื่องด้วยกรรมวิธีที่มีนั้นยังไม่สามารถติดตามพฤติกรรมการไหลพร้อมการอัดตัว (compaction) ที่เกิดขึ้นเป็นปกติ นอกจากปัจจัยเรื่องการขาดระบบสมการ โครงสร้างวัสดุเพื่อติดตามค่าความหนาแน่นแล้วตัวแปรสำคัญอีกประการคือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างแป้งโดกับโลหะทำเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งค่าดังกล่าวเกี่ยวพันโดยตรงกับสภาวะการลื่นไถลของแป้งโดขณะถูกขนถ่ายด้วยกลไกการหมุนของสกรู และถึงแม้ว่าเงื่อนไขการจำลองการไหลสามารถระบุสภาวะการเกิดสภาพลื่นไถล (slipping condition) ได้ก็ตามแต่การได้มาซึ่งค่าดังกล่าวจำเป็นต้องมีผลการทดลองเพื่อระบุย่านอัตราเฉือนที่ก่อให้เกิดสภาวะดังกล่าวและจำเป็นต้องสร้างเครื่องมือวิเคราะห์เฉพาะที่มีค่าความละเอียดสูงซึ่งอยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่ความชื้น 40 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

ค่าอัตราการไหลขาออกที่วัดจริงต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลองในขณะที่ความดันที่วัดจริงสูงกว่าผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระหว่างกระบวนการแปรรูปเม็ดแป้งโดข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์เม็ดแป้งโดเกิดการอัดตัวขึ้นได้โดยการทำงานของสกรูในเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งเป็นการสร้างกลไกการไหลด้วยแรงผสมระหว่าง drag flow force และ pressure flow force ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนตัวไปด้านทางออก

ของหัวคายเป็นอิทธิพลของ drag flow force การอัดตัวได้ของเม็ดแป้งโคในช่องทางการไหลของเครื่องเอกซ์ทรูชันนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นปกติที่จะเห็นได้จากรายงานวิจัยของคณะนักวิจัย Weert ที่ทำการศึกษาถึงลักษณะการอัดตัวของแป้งโคระหว่างกระบวนการแปรรูปโดยเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งแตกต่างจากการศึกษาในกรณีทั่วไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันหรือความเร็วรอบต่ออัตราการผลิตตรงที่นิยมศึกษาโดยสมมติให้แป้งโคขณะแปรรูปมีคุณสมบัติการไหลเหมือนของไหลแบบของหนืดซึ่งไม่มีการอัดตัวเกิดขึ้นระหว่างการไหล เช่น พอลิเมอร์หลอมเหลว น้ำเชื่อมข้าวโพด และพลาสติกซิน (plasticine) เป็นต้น โดยผลศึกษาพบว่าความหนาแน่นของแป้งโคเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นกับค่าความดันในช่องทางการไหลของเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่อาจติดตามได้จากทั้งกรณีการใช้กรรมวิธีการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้หรือหลายงานวิจัย เนื่องด้วยการกำหนดสภาวะการไหลแบบไม่อัดตัวยังไม่สามารถทำได้กับแป้งโคเนื่องด้วยข้อจำกัดตรงที่การปราศจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับความหนาแน่นให้ประยุกต์ใช้งานและไม่อาจติดตามได้โดยการใช้การคำนวณเชิงวิเคราะห์จากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ทั้งหมดที่มีสืบค้นพบในขณะนี้ด้วยเหตุผลที่ได้มาซึ่งผลเฉลยที่กำหนดไว้สำหรับกรณีที่ความหนาแน่นเป็นค่าคงตัวเช่นกัน แม้กระนั้นก็ตาม Weert และคณะได้รายงานไว้ว่ากรณีที่มุมขนถ่ายวัสดุของแจ่งในช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทรูชันในช่วง 1-2 องศา ค่าการอัดตัวได้ของวัสดุในรูปของค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันที่เกิดในช่องทางการไหลได้น้อยกว่าผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เปลี่ยนไปของแป้งโคที่สภาวะการอัดตัวแตกต่างกัน (Weert, 2001)

หากพิจารณาสาเหตุที่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าอัตราการไหลขาออกที่ได้จากการทดลองกับผลจากการจำลองโดยสังเกตจากการทดลองผลจริงจะพบว่า การป้อนเม็ดแป้งโคขนาดเล็กในรูปของการป้อนแบบท่วมช่องทางเข้า (over-flooded feeding) เม็ดแป้งโคก็ยังคงถูกขนถ่ายโดยการหมุนของเกลียวสกรูในลักษณะของการไหลที่ขาดความต่อเนื่องซึ่งเม็ดแป้งโคจะถูกอัดกันแน่นขึ้นเมื่อเคลื่อนเข้าสู่โซนอัดตัว ลักษณะดังกล่าวนี้เองที่แตกต่างจากสภาวะการจำลองที่ประยุกต์ใช้ในทุกกรณีศึกษาที่มีมาซึ่งกำหนดให้เนื้อวัสดุแป้งโคมีการไหลแบบต่อเนื่องหรือไม่เกิดสภาพอัดตัวได้นั่นเอง และต่างจากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ซึ่งอัตราการป้อนหรือการไหลเข้าของแป้งโคจัดว่าเป็นการขนถ่ายแบบมีเนื้อวัสดุอยู่เต็มช่องทางการไหลและไม่มีการอัดตัวเกิดขึ้น โดยปริยายเช่นกัน การสมมติดังกล่าวของทั้งสองกรณีเป็นที่นิยมสำหรับงานศึกษาวิจัยการแปรรูปพอลิเมอร์ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งไม่เป็นที่ปัญหาเนื่องจากเม็ดพอลิเมอร์จะหลอมเป็นของเหลวหนืดจึงทำให้ไหลอยู่เต็มช่องทางการไหล ในกรณีของการใช้วิธีการจำลองการไหลของแป้งโคโดยสมมติให้เป็นการไหลเป็นเต็มช่องทางการไหลเพื่อให้สามารถกำหนดขอบเงื่อนไขของกฎการอนุรักษ์มวลได้จึงให้ความเหมาะสมซึ่งอันที่จริงนั้นเป็นเงื่อนไขการเช็กรูเข้าสู่ที่คอดอบของผลการจำลองดังจะเห็นได้จากผลที่ใกล้เคียงกันมากระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของขาเข้าและขาออก ปรากฏการณ์การอัดตัวได้ของแป้งโคอัน

เป็นผลที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จาก โชนการป้อนเม็ดแป้งโคไน์เองเป็นข้อจำกัดของการจำลองพฤติกรรม การไหลแบบเต็มเกลียวสกรูแม้จะกำหนดให้ใช้สภาวะการผลิตแบบอุณหภูมิกงตัว และอาศัยแบบสมการ วิทยากระแสซึ่งตรวจวิเคราะห์ในย่านที่แป้ง โคเปลี่ยนสภาพที่อุณหภูมิเดียวกันแล้วก็ตาม หากพิจารณาผลสังเกตการณ์เรื่องการอัดตัวนี้ร่วมกับค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามค่าความดัน ไกล่ทางออกของหัวค้าย ยังพบว่าปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นมีผลกระทบน้อยต่อการ จำลองเนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความดันที่ปลายทางออกเพิ่มขึ้นจากความดันทางเข้า เพียง 16 bar ซึ่งจะมีผลให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียง 24.3 kg/m^3 (จากการ เปรียบเทียบกับข้อมูลของ Weert และคณะที่พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อหนึ่ง หน่วยความดันเป็นค่าประมาณ 1.62 kg/m^3 ต่อ 1 bar) ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าหากคำนึงถึงกฎการ อนุรักษ์มวลโดยตัดปัจจัยเรื่องค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก ปัจจัยอื่นที่เหลือที่ทำให้ อัตรา การไหลเชิงมวลที่วัดจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าการจำลองในทุกความเร็วรอบหมุนสกรูนั้นมาจาก เรื่องความเร็วของการเคลื่อนตัวของแป้ง โคสุกในเครื่องเอกซ์ทรูชัน ค่าความเร็ว ได้รับผลกระทบจาก สองเรื่องหลักคือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวชั้นแป้ง โคด้านนอกที่สัมผัสกับ โลหะ อาจปรากฏค่าในย่านที่ก่อให้เกิดสภาวะการลื่น ไถลส่งผลให้แป้ง โคสุกเคลื่อนตัวออกที่หัวค้าย ได้ช้า ลงในสภาวะการผลิตจริง และอีกปัจจัยมาจากการอัดตัวกันของเม็ดแป้ง โคก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างโมเลกุลระหว่างเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยที่ทางออกของหัวค้ายของเครื่อง เอกซ์ทรูชันมีค่าลดลงอย่างมาก แม้ว่าแรงยึดเหนี่ยวนี้ควรถูกสะท้อนในรูปของค่าความหนืดของแป้ง โคด้วยสมการวิทยากระแสที่ตรวจวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ด้วยเครื่องมือที่ให้ความถูกต้องสูงแล้วก็ตาม ผลการจำลองนี้ยังยืนยันถึงความจำเป็นมากของการได้มาก่อนซึ่งสมการวิทยากระแสของแป้ง โค ภายใต้สภาวะการแปรรูปที่ใกล้เคียงกับสภาวะการแปรรูปที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องเอกซ์ทรูชันเพื่อให้ งานการจำลองพฤติกรรม การไหลมีความถูกต้องสูง

นอกจากการสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่นำเสนอในแง่ สภาวะการจำลองที่นิยมใช้กันมากในหมู่นักวิจัยที่ศึกษาถึงกระบวนการแปรรูปแป้ง โคด้วยเครื่อง เอกซ์ทรูชัน (Wang et.al., 2004; Gopalakrishna et.al., 2003; Kumar and Kokini 2003; Dhanasekharan and Kokini ., 2003; Yeh et.al., 1999; Sytjala., 1999; Singh et al., 1997; Chang and Lin., 1995; Karwe and Jaluria ., 1990) ความคลาดเคลื่อนในแง่ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ควรกล่าว รวมไว้ในที่นี้ว่าสมการผลเฉลยของ Rauwendaal ที่ประยุกต์ใช้ในที่นี้ที่มีที่มาจากสมมติให้ช่องทาง การไหลเป็นรูปช่องสี่เหลี่ยมยาว ไม่จำกัด (parallel plate model) อันเกิดจากการคลี่ช่องทาง การไหล ตามเกลียวสกรู และให้ boundary conditions เป็นแบบที่ใช้การหมุนปลอกสกรู ด้วยการสมมติ ดังกล่าวนี้ส่งผลให้อิทธิพลของความโค้งและการบิดตัวของเกลียวสกรูที่มีต่อความเร็วของวัสดุที่ถูก ขนถ่ายไปไม่ได้รับการพิจารณาถึง แม้ว่าขณะนี้จะมีคณะนักวิจัยหลายคณะสนใจดำเนินงานวิจัยและ

พัฒนาเทคนิคการหาแบบสมการผลเฉลยของของไหลผ่านสกรูเพื่อนำเสนอแบบสมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ใหม่โดยคำนึงถึงอิทธิพลของความโค้งและการบิดตัวของเกลียวสกรู ได้แก่ เทคนิค *generalized integral transform*, เทคนิคการหาผลเฉลยแบบอนุกรมกับการไหลใน *helical rectangular channel*, และ เทคนิคการแก้ระบบสมการ *transport equations* โดยใช้ *helical coordinate system* เป็นต้น (Alves et. al., 2009 ; Bereaux et.al., 2004 and Yu et .al., 1997) แบบสมการผลเฉลยดังกล่าวยังต้องได้รับการพิสูจน์ว่าเหมาะสมสำหรับของไหลประเภทอนินวิโทเนียนหรือไม่เนื่องด้วยผลการทดสอบผลเฉลยสำหรับอนินวิโทเนียนกลับมักนำเสนอรายงานวิจัยเฉพาะของไหลชนิดินวิโทเนียนหรือรายงานวิจัยที่นำเสนอของไหลอนินวิโทเนียนแม้ผ่านการทดสอบก็อาจมีข้อจำกัดสำหรับอนินวิโทเนียนบางประเภทดังตัวอย่างที่รายงานไว้โดย Bereaux และคณะ เนื่องด้วยงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตเฉพาะการผลิตแบบอณูมหุ้มิกตัว และเป็นการไหลแบบไม่อัดตัวการเปรียบเทียบผลการจำลองจึงเลือกใช้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li and Hsieh (1995) ที่เป็นที่ยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลาย

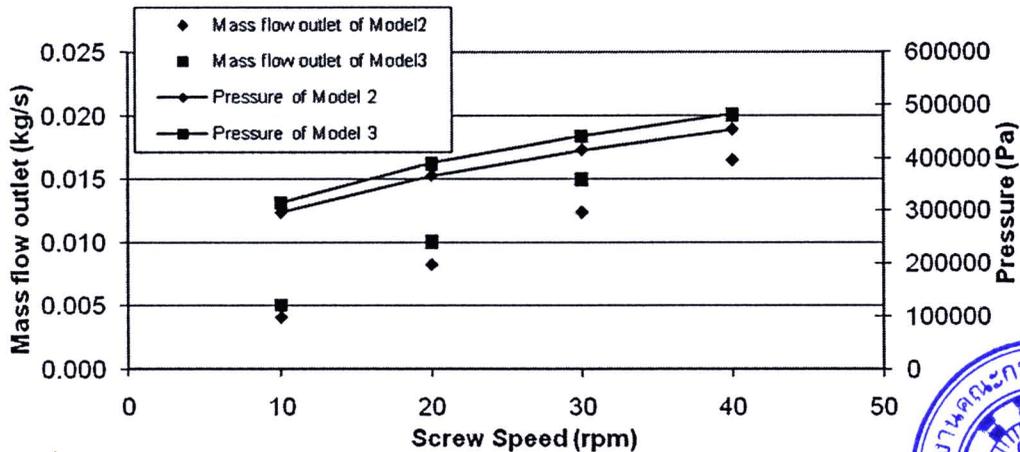
ดังนั้นแม้ว่าผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหรือความดันและค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังคงเป็นไปได้ในด้านของการให้แนวโน้มสำหรับการกำหนดค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิตที่ชัดเจนตามวัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัยเนื่องด้วยแนวโน้มความสัมพันธ์ของผลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลการจำลองมีค่าเดียวกันกับผลการทดลอง อีกทั้งจากการสำรวจข้อมูลรายงานวิจัยเฉพาะเรื่องการแปรรูปแปรงโคด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันพบว่ารายงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอผลการจำลองนั้นนิยมนำเสนอในรูปอัตราการป้อนวัตถุดิบต่อความดันซึ่งค่าดังกล่าวย่อมมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก็ยังมีค่าเท่ากับอัตราการป้อนวัตถุดิบ โดยปริยายดังที่นำเสนอไว้ในส่วนต้น หรือเป็นการจำลองที่ไม่นับรวมชิ้นส่วนของหัวคายที่ทำหน้าที่สร้างความดันย้อนกลับ (back pressure) อันเป็นที่มาของการอัดตัวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแปรรูปแปรงโค การทำนายผลของความดันที่มีต่ออัตราการไหลจึงไม่ปรากฏค่าความคลาดเคลื่อน (Wang et. al., 2004; Kumar and Kokini 2003; Yeh et.al., 1999) กล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการนำผลงานวิจัยที่ได้จากการจำลองชิ้นนี้ในรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแปรงโคเข้าเจ้าด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันไปประยุกต์ใช้ในงานหาค่าเหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตจริงจึงมีเงื่อนไขที่ให้ความถูกต้องสำหรับกรณีที่แปรงโคอัดตัวอยู่เต็มช่องทางการไหลเท่านั้น ทั้งนี้การประยุกต์ค่าไปใช้ในกรณีที่อัตราการป้อนเม็ดแปรงไม่เต็มช่องทางการไหลจำเป็นต้องทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์กับค่าแรงหรือความดันที่สัมพันธ์กับการอัดตัวได้ของแปรงโค (compaction factor)

3.4.6 มิติของสกรูที่มีผลต่อความดัน

นอกจากอุณหภูมิ ความเร็วรอบรวมถึงความชื้นที่มีอิทธิพลต่อความดันแล้วงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลจากมิติของสกรูที่มีผลต่อความดันในเนื้อแป้งข้าวเจ้าด้วย โดยทำการจำลองการอัดตัวของแป้งข้าวเจ้าภายในเครื่องเอกซ์ทรูชัน model 2 และ model 3 ที่มีอัตราส่วน D:H แตกต่างกันซึ่งมีค่า D:H เท่ากับ 6 และ 4 ตามลำดับ แต่ยังคงมิติส่วนอื่นให้มีค่าเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ สำหรับการสร้าง mesh element ให้กับช่องทางการไหลของสกรู model 2 และ model 3 ใช้เทคนิคและวิธีการรวมถึงความละเอียดเช่นเดียวกับที่ใช้ในการสร้าง mesh element ให้กับสกรู model 1 ซึ่งได้รับการตรวจสอบแล้วว่ามีความถูกต้องสูงเพียงพอต่อการจำลอง ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า mesh element ที่สร้างให้กับสกรู model 2 และ model 3 นั้นมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการจำลองเช่นเดียวกัน การจำลองที่กำหนดให้อัตราส่วน D:H ไม่เท่ากันทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอัตราส่วน D:H ซึ่งเกี่ยวข้องกับความลึกของช่องทางการไหลของแป้งโคข้าวเจ้าภายในเครื่องเอกซ์ทรูชัน ผลการจำลองพบว่าเมื่อความลึกของช่องทางการไหลมีค่ามากขึ้นหรืออัตราส่วน D:H ลดลงความดันมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 แสดงผลการเปรียบเทียบความดันเนื่องจากความลึกของช่องทางการไหล สำหรับ model2 และ model3

Screw speed(rpm)	Pressure (Pa)	
	Model2 D:H = 6	Model3 D:H = 4
10	297480	315595
20	367399	389789
30	415727	441073
40	453863	481571



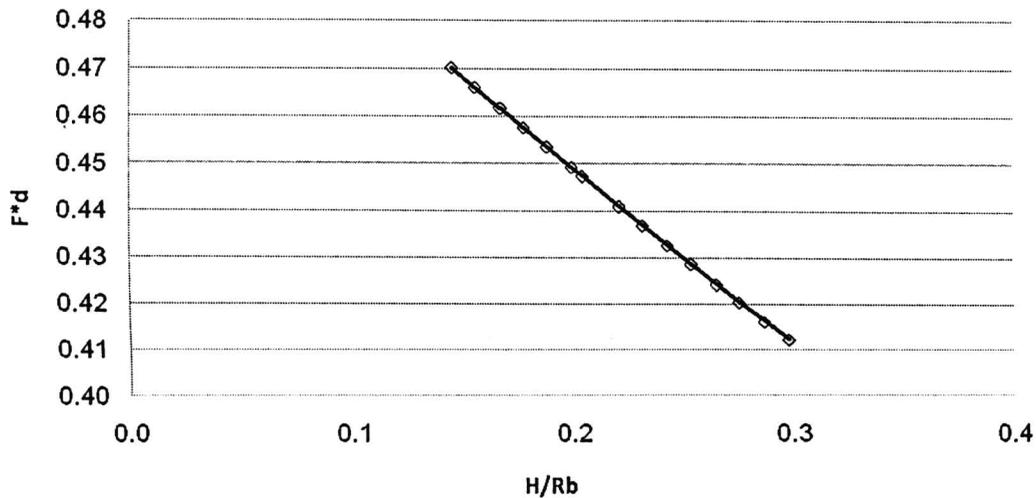
รูปที่ 3.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนสกรูกับอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์และความดันของ Model 2 และ Model 3 ตามลำดับ

พิจารณารูป 3.26 พบว่าเมื่อเพิ่มความลึกให้กับช่องทางการไหลภายในสกรูหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือลดอัตราส่วน D:H ลงจากอัตราส่วน D:H เท่ากับ 6 เป็น D:H เท่ากับ 4 หรือลดลง 33% พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากหัวคายนี้ออกมามีค่าเพิ่มมากขึ้น 21% และความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น 6% ทุกๆรอบหมุนของสกรู จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า การเพิ่มความลึกของช่องทางการไหลภายในสกรู (อัตราส่วน D:H ลดลง) ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์และความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น

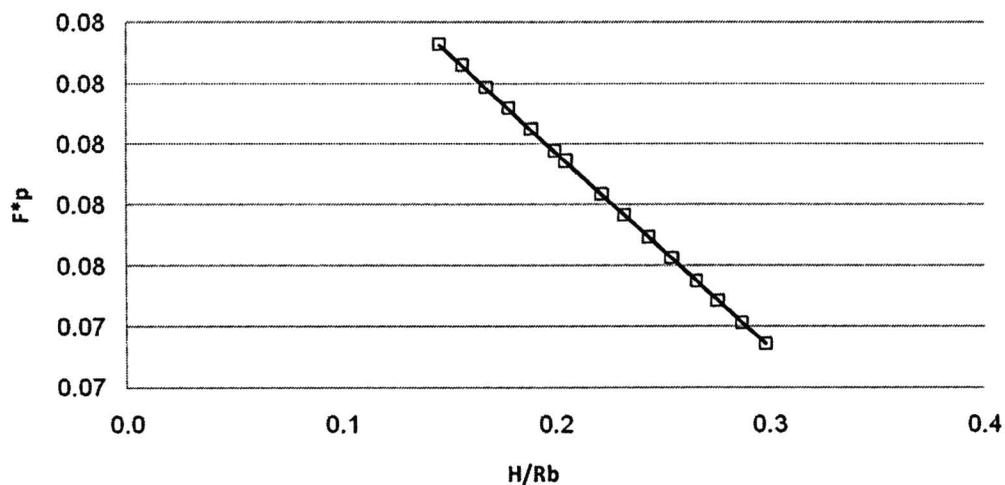
3.4.7 ตัวแปรไร้มิติ

ตัวแปรไร้มิติถูกใช้เพื่อเป็นปัจจัยในการออกแบบมิติของสกรู รูปที่...แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of drag flow (F^*_d) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_o) ที่ค่า $\phi_b = 18.4^\circ$ จากรูปพบว่าเมื่อค่า H/R_o เพิ่มมากขึ้นค่า F^*_d มีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นซึ่งมีหมายความว่าเมื่อความลึกของช่องทางการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการจุลลากวัสดุของสกรูดังกล่าวนั้นมีค่าลดลง นอกจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of pressure flow (F^*_p) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_o) ก็มีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกล่าวคือเมื่อค่า H/R_o เพิ่มขึ้นค่า F^*_p มีค่าลดลงดังแสดงไว้แล้วในรูปที่.... ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้เพื่อหาค่า H/R_o ที่มีความเหมาะสมสำหรับค่า $\phi_b = 18.4^\circ$ เพื่อให้สกรุนั้นสามารถจุลลากวัสดุให้เคลื่อนที่ไปสู่ปลายทางออกได้ตามที่ต้องการ นอกจากนั้นแล้วรูปที่...ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลกับค่าตัวแปรไร้มิติความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 20 30 และ 40 รอบต่อวินาทีตามลำดับ รูปดังกล่าวจะ

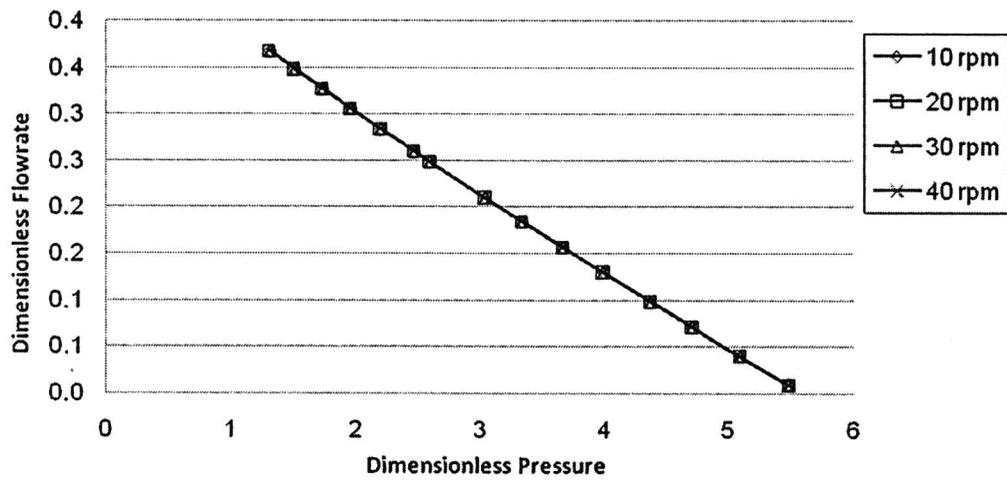
ถูกใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความดัน โดยค่าจุดตัดในแกนนอนบ่งบอกถึงค่าสูงสุดของตัวแปรไร้มิติความดัน จากรูปพบว่ามีความประมาณ 5.5 รูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นอีกว่าเมื่อทำการเปลี่ยนรอบหมุนของสกรูกลับพบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าตัวแปรไร้มิติ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าความเร็วของรอบหมุนไม่มีผลต่อตัวแปรไร้มิติหากมิติของสกรูมีค่าคงตัว



รูปที่ 3.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of drag flow (F^*_{d}) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_b)



รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of pressure flow (F^*_{p}) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_b)



รูปที่ 3.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลกับตัวแปรไร้มิติความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 20 30 และ 40 รอบต่อนาที