บทที่ 4
การออกแบบเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดระดับเล็ก

ในการออกแบบเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดระดับเล็กเพื่อใช้ในงานวิจัย มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

4.1. การคำนวณขั้นต้น

สำหรับขั้นในการออกแบบชุดเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบด สิ่งแรกที่ต้องทราบคือ ค่าความเร็วของอากาศต่ำสุดที่จำเป็นสำหรับการฟลูอิดไดซ์อนุภาค (minimum fluidization velocity) และค่าความเร็วที่สามารถทำให้อนุภาคหลุดลอยไปกับอากาศหรือความเร็วบั้นปลาย (terminal velocity) โดยอาศัยข้อมูลทางกายภาพของวัสดุผงซึ่งได้แก่ ความหนาแน่น, ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่ต้องการนำไปผลิตแกรนูลเป็นพื้นฐานการคำนวณ

ในการคำนวณค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์และความเร็วบั้นปลาย ดังที่กล่าวมาข้างต้นการคำนวณค่าความเร็วทั้งสองต้องอาศัยข้อมูลทางกายภาพของวัสดุผง จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดชนิดของวัสดุผงที่ต้องการผลิตเป็นแกรนูลเพื่อที่จะได้ทราบค่าความหนาแน่นที่แน่นอน และกำหนดขนาดของอนุภาคหรือวัสดุผงโดยนำขนาดเฉลี่ยเล็กที่สุดและใหญ่ที่สุดของอนุภาคหรือแกรนูลที่คาดว่าจะเกิดในกระบวนการทำแกรนูล มาใช้ในการคำนวณค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์และค่าความเร็วบั้นปลาย จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบขนาดภาชนะบรรจุของเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบด, ขนาดเครื่องเป่าอากาศที่จำเป็นสำหรับการทำให้อนุภาคหรือวัสดุผงเกิดฟลูอิดไดเซชัน และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศเพื่ออบแห้งอนุภาคเปียกหรือแกรนูล

4.1.1 การคำนวณค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน, U_{mf}

ก่อนที่จะเกิดการฟลูอิดไดเซชัน อนุภาคผงซึ่งถูกบรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุจะเกาะกันเป็นชั้นของอนุภาค เมื่อมีของไหลไหลผ่านชั้นอนุภาค การเกาะตัวของอนุภาคผงจะลดลงเนื่องจากมีแรงลากจากของไหลมาทำลายแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาค ในระบบที่ของไหลเป็นก๊าซเมื่อปรับความเร็วของก๊าซจนถึงสภาวะที่ชั้นอนุภาคกำลังเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน ชั้นอนุภาคผงยังคงมีการรวมตัวเป็นชั้นที่มีความพรุนมากที่สุด หากทำการเพิ่มค่าความเร็วของก๊าซให้สูงขึ้นอีกเล็กน้อย ชั้นอนุภาคก็จะเริ่มเกิดการขยายตัวและอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนก็จะเริ่มหลุดลอยไปพร้อมกับก๊าซ ซึ่งสามารถการคำนวณค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้โดยนำสมการของ

Ergun (fluidization engineering D. Kunii และ O. Levenspiel, หน้าที่ 69) ในการคำนวณโดยตั้งสมมุติฐานให้อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{150(1-\varepsilon)\mu U_{mf}}{\varepsilon^3 Dp^2} + \frac{1.75\rho U_{mf}^2}{Dp} = (\rho_s - \rho)g$$

เมื่อ ε คือ ความพรุนของเบด

D_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)

μ คือ ความหนืดของอากาศ (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาที^{2})

สำหรับงานวิจัยนี้อนุภาคที่ใช้ได้แก่แล็กโทสและแป้งข้าวโพด ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพดังนี้

แล็กโทส

มีความหนาแน่นปรากฏ, ρ_s = 1543.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร

ความพรุน, ε = 0.534

แป้งข้าวโพด

มีความหนาแน่นปรากฏ ρ_s = 1478 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร

ความพรุน, ε = 0.455

และ ความหนาแน่นของอากาศ, ρ = 0.0012 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร

ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, g = 9.8 เมตรต่อวินาที^{2}

เนื่องจากในการคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันจำเป็นต้องทราบขนาดของอนุภาค เนื่องจากในกระบวนการเกิดแกรนูลจะมีอนุภาคหรือแกรนูลที่มีขนาดต่างกันอยู่ร่วมกัน จึงจำเป็นต้องคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคทุกขนาด สำหรับงานวิจัยนี้เรากำหนดขนาดใหญ่ที่สุดของอนุภาคหรือแกรนูลที่ต้องการที่ 1000 ไมครอน และสามารถประมาณค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของอุนภาคแล็กโทสขนาดตั้งแต่ 10 ถึง 1000 ไมครอน ได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของอุนภาคแล็กโทส ขนาดตั้งแต่ 10 ถึง 1000 ไมครอน

	ขนาดอนุภาค, ไมครอน						
	10	20	40	50	70	100	150
U_{mf} (เซนติเมตรต่อวินาที)	0.0004	0.0018	0.007	0.01	0.02	0.04	0.1
	200	300	400	500	600	800	1000
U_t (เซนติเมตรต่อวินาที)	0.18	0.4	0.7	1.1	1.59	2.8	4.3

4.1.2. การคำนวณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคผง, U_t

เมื่อพิจารณาอนุภาคของวัสดุผง โดยสมมติให้อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมและเป็นอนุภาคเดี่ยวที่ไม่มีอิทธิพลของอนุภาคอื่นหรือไม่มีอิทธิพลเนื่องจากผนังภาชนะ จะสามารถประมาณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคได้ โดยการพิจารณาสมการสมดุลของแรงตามกฎของที่ 1 ของนิวตันได้ ซึ่ง McCabe และคณะได้เสนอวิธีการประมาณค่าความเร็วดังกล่าวโดยการพิจารณาค่าพาริมิเตอร์ K แทนค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการให้หลักการลองผิดลองถูก (trial and error) ในการค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคเดี่ยว

ค่าพารามิเตอร์ K ถูกกำหนดให้สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (จาก Unit operations of chemical engineering W.Mcabe, หน้าที่ 103)

$$K = Dp\left[\frac{g\rho(\rho S - \rho)}{\mu^2}\right]^{1/3}$$

ในกรณีที่การไหลของของไหลสัมพันธ์กับอนุภาคมีลักษณะเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สอดคล้องกับกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ค่า K จะมีความสัมพันธ์กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) คือ $Re = K^3/18$ ตากฎของสโตกส์การไหลของของไหลมีลักษณะแบบราบเรียบได้นั้นค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยกว่า 2.0 ดังนั้นค่า K จะต้องมีค่าน้อยกว่า 3.3 และสามารถประมาณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคเดี่ยวได้จากกฎของสโตกส์

$$U_t = \frac{(\rho S - \rho)gD_P^2}{18\mu}$$

ในทำนองเดียวกันหากอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีความหนาแน่นมากขึ้น การไหลของของไหลที่สามารถทำให้อนุภาคหลุดลอยไปกับของไหลได้นั้นจะต้องมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้น ทำให้เงื่อนไขในการพิจารณาค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป เราจะไม่สามารถนำกฎของสโตกส์มาใช้ได้อีก ในกรณีนี้เราจะสามารถนำกฎของอัลเลน (Allen's law) มาใช้ในการ

ประมาณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคเดี่ยวได้ โดยค่า K จะมีต้องค่าอยู่ในช่วง 3.3 ถึง 43.6 และจะประมาณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคจากสมการ

$$U_t = 0.153 \frac{(\rho S - \rho)^{0.71} g^{0.71} D p^{1.14}}{\mu^{0.43} \rho^{0.29}}$$

ถ้าหากอนุภาคที่พิจารณามีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีความหนาแน่นมาขึ้นจนไม่สามารถนำ กฎของอัลเลนมาใช้ในการประมาณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคได้ จะสามารถนำสมการกฎของนิวตัน (Newton's law) มาใช้ในการประมาณค่าความเร็วดังกล่าวแทน ซึ่งค่า K จะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 43.6 ถึง 2360 และจะสามารถประมาณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคเดี่ยวจากสมการ

$$U_t = 1.75 \sqrt{\frac{(\rho S - \rho) g D p}{\rho}}$$

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคแล็กโทสขนาดต่าง ๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคแล็กโทสขนาดตั้งแต่ 10 - 1000 ไมครอน

ขนาดอนุภาค, ไมครอน	ค่า K	U_t (เซนติเมตรต่อวินาที)
10	0.38	0.46
50	1.9	11.6
100	3.8	41.4
300	11.45	145.0
500	19.1	260.0
800	30.5	443.0
1000	38.2	572.0

สำหรับกรณีของแป้งข้าวโพดพบว่ามีความหนาแน่นใกล้เคียงกับแล็กโทส ความเร็วต่ำสุดที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์และความเร็วปั่นปลายของอนุภาคแป้งข้าวโพดขนาดต่าง ๆ จึงมีค่าใกล้เคียงกับแล็กโทสสามารถใช้แทนกันได้

4.1.3. การกำหนดค่าความเร็วอากาศที่ใช้การฟลูอิดไดซ์อนุภาคในการทดลอง

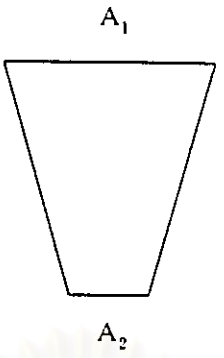
เมื่อคำนวณค่าความเร็วอากาศต่ำสุดสำหรับการเกิดฟลูอิดไดเซชันและความเร็วบั้นปลายของอนุภาคจากข้างต้น ขั้นต่อมาเป็นการกำหนดช่วงความเร็วการกำหนดค่าความเร็วอากาศที่ใช้การฟลูอิดไดซ์อนุภาคในการทดลองโดยมีเงื่อนไขดังนี้

1. อนุภาคส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมดจะต้องถูกทำให้อยู่ในสภาวะฟลูอิดไดเซชันได้
2. ค่าความเร็วอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์อนุภาคทั้งหมดไม่ควรจะสูงกว่าค่าความเร็วบั้นปลายของอนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่ต้องการศึกษา

ดังนั้นสิ่งสำคัญอันดับแรกคือการกำหนดช่วงขนาดอนุภาคที่ต้องการให้ฟลูอิดไดซ์ โดยกำหนดให้ อนุภาคเล็กที่สุดที่จะใช้ในการทดลองมีขนาด 50 ไมครอน (เนื่องจากในทางเภสัชอุตสาหกรรมขนาดของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมแกรนูลโดยวิธีนี้ควรมีขนาดโดกว่า 50 ไมครอน Gamlen (1982) และใหญ่ที่สุดเท่ากับ 1000 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดของแกรนูลใหญ่ที่สุดที่สามารถนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพของแกรนูลต่อไปได้ จากการพิจารณาเงื่อนไขข้างต้นสรุปได้ว่า

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.2 สำหรับอนุภาคที่มีขนาดขนาด 50 ไมครอน ซึ่งมีค่าความเร็วบั้นปลายเท่ากับ 11.6 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วอากาศค่านี้เป็นความเร็วสูงสุดที่สามารถใช้ได้ในการทดลอง เนื่องจากที่ความเร็วอากาศค่านี้อนุภาคที่มีขนาด 50 ไมครอนยังเกิดฟลูอิดไดซ์อยู่ในระบบไม่หลุดไปพร้อมกับอากาศแต่เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศสูงกว่านี้ อนุภาคที่มีขนาด 50 ไมครอนจะหลุดไปพร้อมกับอากาศ และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.1 ที่ความเร็วอากาศค่านี้สามารถฟลูอิดไดซ์อนุภาคทุกขนาดในช่วงขนาดที่กำหนดได้ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งสอง

แม้ว่าความเร็วดังกล่าวก็จะยังสูงเพียงพอให้อนุภาคขนาดใหญ่เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ แต่ทั้งนี้การประมาณดังกล่าวเป็นเพียงการประมาณโดยอาศัยสมมติฐานว่าอนุภาคเป็นอนุภาคทรงกลมที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากอนุภาคอื่นและผนังของภาชนะ ประกอบกับในทางปฏิบัติเราต้องการให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคภายในภาชนะ, มีการผสมที่ดีขึ้น, มีอัตราการอบแห้งที่สูงและต้องทำให้อนุภาคขนาดต่าง ๆลอยขึ้นไปกระทบกับหยดละอองสารยึดเกาะแล้วเกิดเป็นแกรนูลที่มีความชื้น, มีขนาดและความหนาแน่นมากขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้อากาศที่มีความเร็วมากขึ้นหรืออัตราการไหลสูงพอที่จะทำให้เกิดการผสมที่ดีและสามารถอบแห้งแกรนูลที่มีชื้น ดังนั้นจึงทำการออกแบบรูปร่างของภาชนะของเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดในส่วนของภาชนะส่วนขยายให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะการออกแบบภาชนะส่วนขยาย

ลักษณะรูปทรงกรวยที่ออกแบบซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นตามความสูง ซึ่งลักษณะนี้เองทำให้ความเร็วของอากาศมีค่าลดลงตามพื้นที่หน้าดัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณความเร็วอากาศที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นโดยอาศัยสมการความต่อเนื่องของอากาศที่ไหลผ่านภาชนะส่วนขยายได้จากสมการ

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

โดยที่ V_1, V_2 คือ ความเร็วของอากาศตำแหน่ง 1 และ 2

A_1, A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของภาชนะส่วนขยาย ตำแหน่ง 1 และ 2

ในการออกแบบกำหนดให้

พื้นที่หน้าตัดส่วนบนมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น D_1 = 30 เซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัดส่วนล่างมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น D_2 = 10 เซนติเมตร

ที่บริเวณพื้นที่หน้าดัด A_1 ต้องมีอากาศที่กำลังไหลด้วยความเร็วสูงสุด, V_1 ไม่เกิน 11.6 เซนติเมตรต่อวินาที (ถ้าความเร็วอากาศสูงกว่าค่าที่กำหนดนี้จะส่งผลให้มีอนุภาคที่มีขนาด 50 ไมครอนหลุดลอยออกไปพร้อมกับอากาศ) จากสมการข้างต้นจะคำนวณค่าความเร็วอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ได้เท่ากับ 104.4 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งหมายความถึงหากเราทำการป้อนอากาศเข้าไปในภาชนะส่วนนี้ด้วยความเร็วไม่เกิน 100 เซนติเมตรต่อวินาที อนุภาคทั้งหมดจะเกิดฟลูอิดไดเซชันและฟุ้งกระจายอยู่ในภาชนะและความเร็วของอากาศจะค่อย ๆลดลงจนมีค่าเท่ากับความเร็วบั้นปลายของอนุภาคขนาด 50 ไมครอนที่พื้นที่หน้าตัด A_1 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร) อนุภาคที่มีขนาดประมาณตั้งแต่ 50 ไมครอนขึ้นไปจึงจะไม่หลุดลอยไปพร้อมกับอากาศแต่จะกลับลอยอยู่หรือตกกลับลงมายังบริเวณด้านล่าง การออกแบบเช่นนี้จะส่งผลให้เกิด

การหมุนเวียนของอนุภาคและสามารถปรับค่าความเร็วอากาศในการผลิตแกรนูลได้กว้างขึ้นซึ่งเป็นลักษณะที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

ดังนั้นช่วงความเร็วอากาศที่ใช้การฟลูอิดไดซ์อนุภาคในการทดลองนี้ คือ 0.1 ถึง 1.0 เมตรต่อวินาที

4.1.4. การพิจารณาเลือกขนาดเครื่องเป่าอากาศ (Blower)

ในการประมาณขนาดของเครื่องเป่าอากาศ เราจำเป็นต้องทราบอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงสุดและความดันของอากาศที่เราต้องการใช้งาน สำหรับการประมาณอัตราการไหลสูงสุดสามารถคำนวณได้จากค่าความเร็วอากาศจากการคำนวณข้างต้น นั้นคือความเร็วอากาศสูงสุดเท่ากับ 100 เซนติเมตร/วินาที

ประมาณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, Q ได้จากสมการ

$$Q = v \times A$$

เมื่อ

v = ความเร็วของอากาศ, เซนติเมตรต่อวินาที

A = พื้นที่หน้าตัดของภาชนะส่วนขยายส่วนล่าง (A_2)
ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง, D เท่ากับ 10 เซนติเมตร

$= \pi D^2 / 4$

= 78.57 ตารางเซนติเมตร

ดังนั้นคำนวณ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ต้องการได้ จาก

$Q = v \times A$

= 7857 ลูกบาศ์กเซนติเมตรต่อวินาที

หรือ = 28.3 ลูกบาศ์กเมตรต่อชั่วโมง

นั้นคือจำเป็นต้องใช้อากาศอย่างน้อย 28.3 ลูกบาศ์กเมตรต่อชั่วโมง เพื่อทำให้อนุภาคแล็กโทสเกิดการหมุนเวียนภายในภาชนะที่ออกแบบ

สำหรับการประมาณค่าความดันของอากาศที่ต้องป้อนเข้าไปในภาชนะ ได้อาศัยข้อมูลจากเครื่องทำแกรนูลที่มีใช้งานจากทาง ภาควิชาเภสัชอุตสาหกรรม คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จัดซื้อโดยการนำเข้ามาจากต่างประเทศ) มาพิจารณาประกอบ พบว่า เครื่องมือดังกล่าวสามารถทำงานโดยป้อนอากาศที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรสูงถึง 2 ลูก

บาศ์กเมตรต่อนาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 5000 นิวดันต่อตารางเมตร (= 509.89 มิลลิเมตรน้ำ) ดังนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการพิจารณาตัดสินใจเลือกเครื่องเป่าอากาศที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดในประเทศ

4.1.5 การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้เพิ่มอุณหภูมิอากาศในการอบแห้งแกรนูล

โดยทั่วไปการทำแกรนูลโดยอาศัยฟลูอิดไดซ์เบด มักจะทำงานโดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส ในการอบแห้งแกรนูล สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดให้การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 28.3 ลูกบาศ์กเมตรต่อชั่วโมง (หรือ 0.0078 ลูกบาศ์กเมตรต่อวินาที) จากอุณหภูมิห้อง (~25 องศาเซลเซียส) เป็น 80 องศาเซลเซียส โดยให้มีปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจะสามารถประมาณได้จากสมการ

$$E = Q \times C_p \Delta T$$

เมื่อ

E = ปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ, กิโลวัตต์

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, เมตร/วินาที

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, 1.28 กิโลจูลต่อลูกบาศ์กเมตร-องศาเซลเซียส

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งกับอากาศที่อุณหภูมิห้อง.

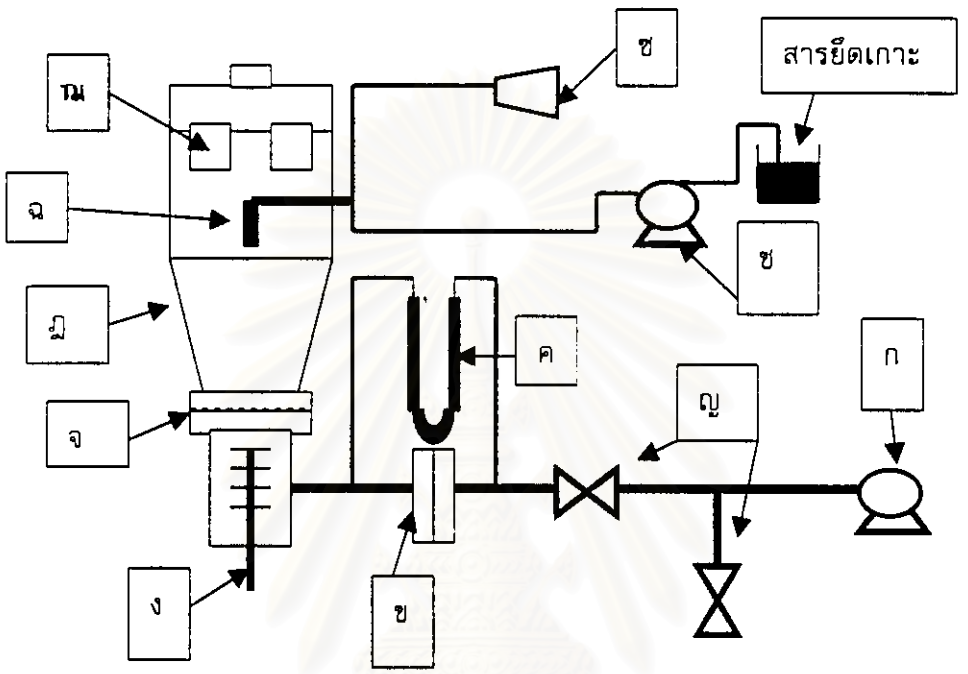
นั้นคือ

$$E = 0.0078 \times 1.28 \times (80 - 25)$$
$$= 0.549 \text{ กิโลวัตต์}$$

ดังนั้นเครื่องให้ความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าภาชนะเป็น 80 องศาเซลเซียส จะต้องให้พลังงานความร้อนได้ไม่น้อยกว่า 0.549 กิโลวัตต์

4.2. ส่วนประกอบเครื่องทำแกรนูลแบบฟลูอิดไดซ์เบดระดับเล็ก

จากข้อมูลข้างต้น จึงทำการออกแบบเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดและดำเนินงานจัดสร้างขึ้น โดยมีส่วนประกอบหลักต่างๆดังรูปที่ 3.2



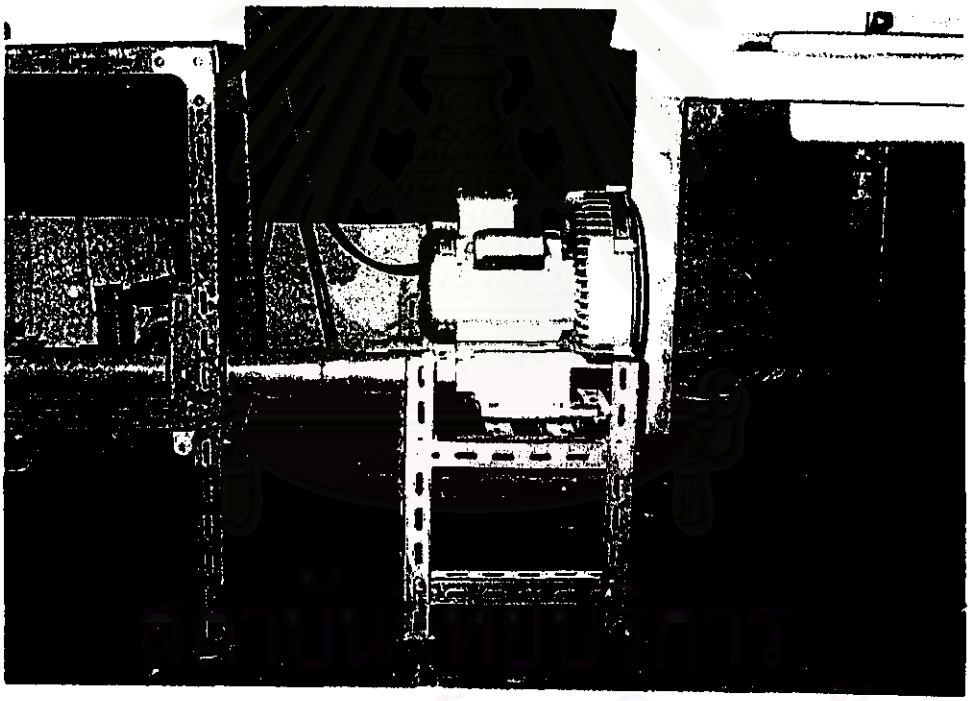
รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบของเครื่องทำแกรนูลแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่จัดสร้างขึ้น

(ก) เครื่องเป่าอากาศ (ข) แผ่นออริฟิซ
(ค) มานอมิเตอร์ (ง) ระบบทำความร้อน
(จ) แผ่นกระจายอากาศ (ฉ) หัวฉีด
(ช) ปั๊มป์แบบเพอริสตอลดิก (ซ) เครื่องอัดอากาศ
(ฌ) ระบบถุงกรอง (ญ) ระบบท่อและวาล์ว
(ฏ) ภาชนะเครื่องทำแกรนูลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

สำหรับรายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ จะได้ชี้แจงตามลำดับดังต่อไปนี้

4.2.1 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)

ใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบ ริงโบลเวอร์ (ring blower) มีขนาด 1 แรงม้า, ความเร็วรอบ 3450 รอบต่อนาที, อัตราการไหลอากาศสูงสุด 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และให้ความดันสูงสุด 1500 มิลลิเมตรน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เครื่องเป่าอากาศ

4.2.2 แผ่นออริฟิซ

แผ่นออริฟิซทำจากอะคิลิก (acrylic) โดยเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ตรงบริเวณกึ่งกลางของแผ่น โดยจะติดตั้งอยู่ภายในท่อโดยวางในลักษณะขัดขวางการไหลของอากาศภายในท่อ อากาศถูกบังคับให้ไหลผ่านรูที่เจาะทำให้เกิดค่าความดันลด (pressure drop) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหลของอากาศที่ไหลในท่อ

4.2.3 มานอมิเตอร์

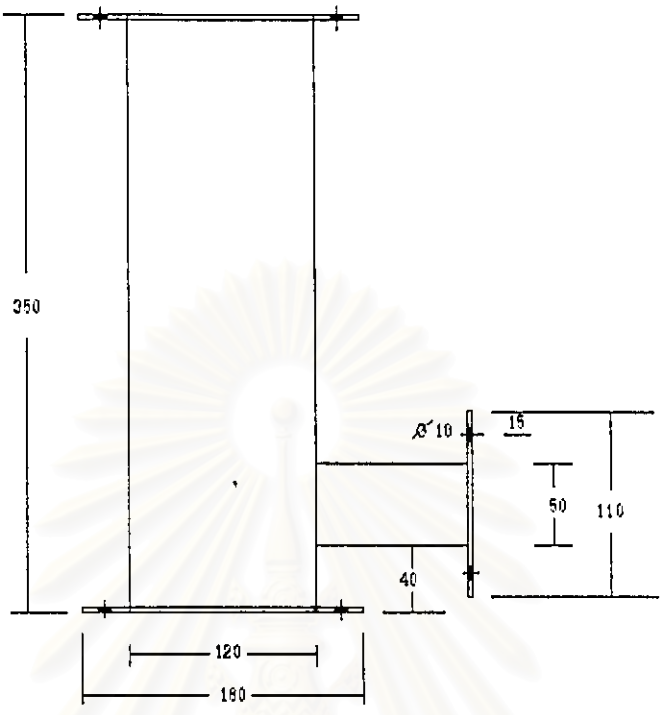
ทำจากแท่งแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ดัดงอเป็นรูปตัวยูและบรรจุน้ำภายใน ใช้สำหรับวัดค่าความดันลดของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่านรูของแผ่นออริฟิซ โดยแสดงออกมาในลักษณะผลต่างความสูงของระดับน้ำในท่อรูปตัวยู

เมื่อกำหนดให้ขนาดรูของแผ่นออริฟิซมีขนาดคงที่ ค่าความดันลดจะแปรผันกับอัตราการไหลหรือความเร็วของอากาศที่ไหลภายในท่อ ซึ่งสามารถนำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดซึ่งแสดงอยู่ในรูปของผลต่างความสูงของน้ำในมานอมิเตอร์ กับค่าความเร็วของอากาศที่ไหลภายในท่อ โดยการปรับวาล์วเพื่อปรับค่าความเร็วของอากาศที่ไหลภายในท่อ ให้มีค่าต่าง ๆ ทำการวัดค่าความเร็วอากาศนี้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วอากาศ (velocity probe รุ่น Testo 450) และบันทึกค่าผลต่างความสูงของน้ำในมาโนมิเตอร์ นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการปรับค่าความเร็วอากาศที่ใช้ในฟลูอิดไดซ์ในการทดลองต่อไป

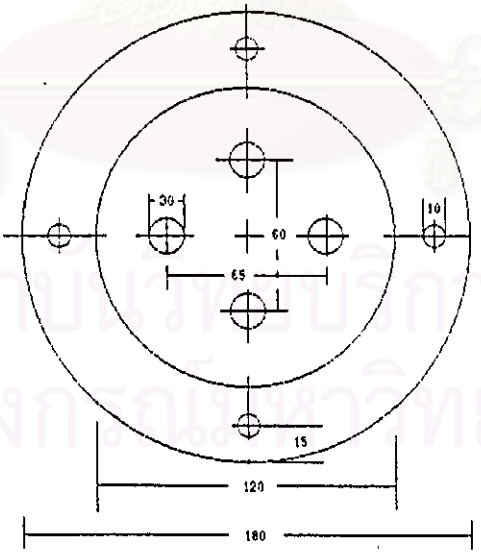
4.2.4 ระบบทำความร้อน

ประกอบด้วยแท่งให้ความร้อนเพื่อใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจำนวน 2 ชุด คือ ขนาด 750 วัตต์ และ 1500 วัตต์ แท่งให้ความร้อนมีลักษณะเป็นรูปตัวยู (U shaped) และติดตั้งอยู่ในภาชนะหุ้มซึ่งทำจากท่อเหล็กเหนียวในรูปที่ 4.4 (ก) ทั้งนี้ แท่งให้ความร้อนจะถูกยึดติดกับแผ่นยึดในรูปที่ 4.4 (ข) แล้วจึงสอดเข้าไปด้านล่างของภาชนะหุ้ม รูปที่ 4.4 (ค) แสดงระบบทำความร้อนที่จัดสร้างขึ้น

โดยที่อากาศจากเครื่องเป่าอากาศจะเข้าสู่ระบบทำความร้อนจากทางด้านข้าง อากาศจะไหลผ่านแท่งให้ความร้อน จนมีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วจึงไหลออกทางด้านบนเข้าสู่ภาชนะเครื่องทำแกรนูลแบบฟลูอิดไดซ์เบดต่อไป

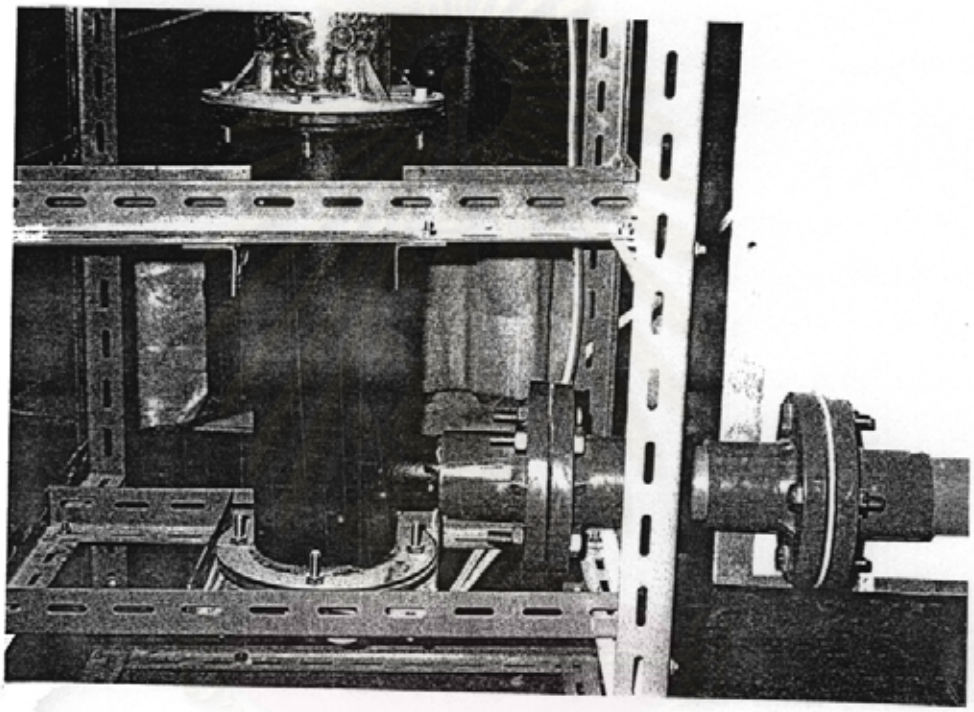


(ก)



(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค)

รูปที่ 4.4 ระบบทำความร้อน
(ก) แบบภาชนะหุ้ม (มิลลิเมตร)
(ข) แบบแผ่นยึดแท่งให้ความร้อน (มิลลิเมตร)
(ค) ระบบทำความร้อนที่จัดสร้างขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.5. ชุดควบคุมอุณหภูมิของอากาศ

สำหรับตั้งค่าและการควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ต้องการใช้ในการฟลูอิดไดซ์อนุภาคและอบแห้งแกรนูลจะใช้ชุดควบคุมที่ประกอบด้วย

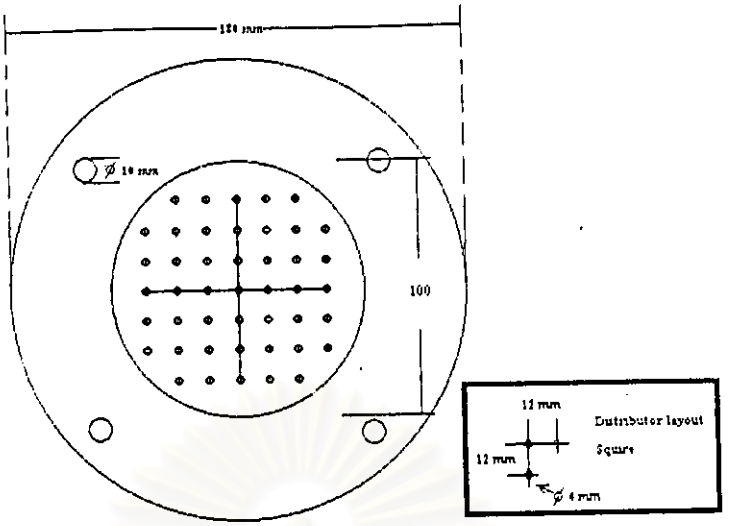
1. เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ทำหน้าที่เป็นตัววัดอุณหภูมิของอากาศและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

2. ตัวควบคุม (controller) สามารถตั้งค่าอุณหภูมิของอากาศที่ต้องการ (set point) และควบคุมให้อุณหภูมิอากาศมีค่าคงที่ตามที่กำหนด โดยตัวควบคุมทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าที่มาจากเทอร์โมคัปเปิลและเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ กรณีที่อุณหภูมิอากาศยังไม่ถึงค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะจ่ายกระแสเข้าสู่แท่งให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้สูงขึ้น และถ้าอุณหภูมิของอากาศสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะหยุดจ่ายไฟฟ้าสู่แท่งให้ความร้อน สำหรับตัวควบคุมที่ใช้ในที่นี้เป็นแบบเปิด-ปิด และมีหน้าปัดแสดงค่าอุณหภูมิของอากาศที่วัด การทำงานของตัวควบคุมจะทำงานร่วมกับสวิตช์แม่เหล็ก (magnetic switch) ที่จ่ายและตัดกระแสไฟที่เข้าสู่แท่งให้ความร้อน

4.2.6. แผ่นกระจายอากาศ

สำหรับส่วนของแผ่นกระจายอากาศทำจากแผ่นอะคิลิก ซึ่งเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างรูเท่ากับ 12 มิลลิเมตรและการจัดเรียงรูเป็นแบบสี่เหลี่ยมดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และด้านบนของแผ่นกระจายอากาศจะติดตั้งแผ่นตะแกรงขนาด 120 เมช (mesh) เพื่อใช้ป้องกันไม่ให้วัตถุดิบหล่นลงไปด้านล่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 แบบแผ่นกระจายอากาศ (มิลลิเมตร)

4.2.7. หัวฉีด (**Binary nozzle**)

สำหรับหัวฉีดจะทำหน้าที่พ่นสารยึดเกาะเข้าไปในภาชนะ หัวฉีดที่ใช้เป็นหัวฉีดแบบ แอร์อะตอมไมซิง สเปรย์ (air atomizing spray nozzle) โดยมีการป้อนของเหลวและอากาศเข้าไปในหัวฉีดและพ่นออกมาเป็นละอองขนาดเล็ก โดยยึดหัวฉีดกับแขนจับหัวฉีดซึ่งทำจากท่อพีวีซี (PVC) ในรูปที่ 4.6 เพื่อติดตั้งหัวฉีดให้อยู่บริเวณกลางภาชนะของเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบด

เนื่องจากในการทดลองนี้มีการปรับเปลี่ยนค่าความดันที่ใช้ในการพ่นละออง ซึ่ง ค่าความดันอากาศที่ใช้ในการพ่นละอองจะมีผล ต่อ มุมการพ่น, ขนาดของหยดละออง

ตารางที่ 4.3 เป็นตารางแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางและมุมการพ่นของเหลวที่ความดันในการพ่นละอองค่าต่างๆ และตารางที่ 4.4 เป็นตารางแสดงการกระจายขนาดและขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ความดันอากาศที่ใช้ในการพ่นละอองค่าต่างๆ เมื่อกำหนดให้

ชนิดของเหลว	น้ำ
อัตราการป้อนของเหลว	20 มิลลิลิตรต่อนาที
ความสูงของหัวฉีดเหนือแผ่นกระจายอากาศ	20.5 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงมุมการพ่นของเหลวที่ความดันอากาศที่ใช้ในการพ่นละอองต่างๆ

ความดันที่ใช้ในการพ่นละออง, บาร์	เส้นผ่านศูนย์กลาง, เซนติเมตร	มุมการพ่น, องศา
0.5	5.5	15.3
1.0	6.5	18.0
1.5	7.0	19.4
2.0	7.5	20.7

เมื่อความดันในการพ่นละอองสูงขึ้น พื้นที่ที่ครอบคลุมการพ่นและมุมการพ่นมีค่าสูงขึ้น

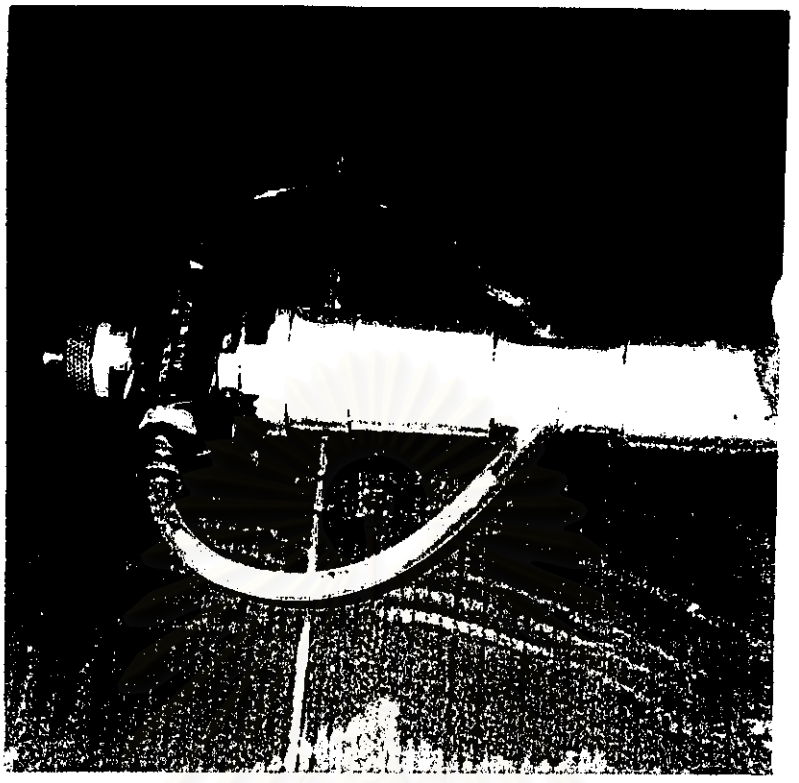
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการกระจายขนาดและขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ความดันอากาศที่ใช้ในการพ่นละอองค่าต่างๆ

ขนาดหยดละออง, ไมครอน	ความดันอากาศที่ใช้ในการพ่นละออง, บาร์			
	0.5		1.0	
	จำนวนอนุภาค	เปอร์เซ็นต์	จำนวนอนุภาค	เปอร์เซ็นต์
10	15	14.3	30	28.6
20	12	11.4	33	31.4
30	18	17.1	21	20.0
40	24	22.9	15	14.3
50	27	25.7	6	5.7
60	9	8.6	0	0.0
รวม	105	100	105	100
ขนาดหยดละอองเฉลี่ย	36	ไมครอน	23.7	ไมครอน

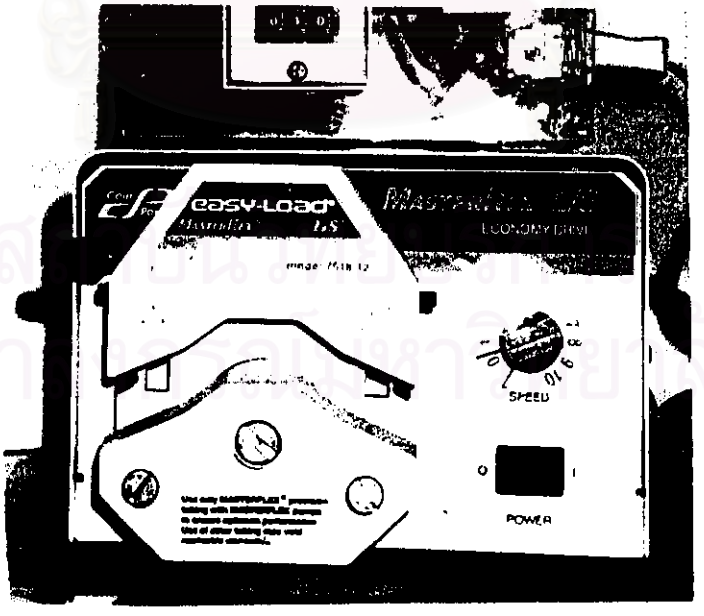
ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความดันอากาศที่ใช้ในการพ่นละอองสารยึดเกาะเพิ่มขึ้นหยดละอองมีขนาดเล็กลง

4.2.8. ปั๊มป์แบบเพอริสตอลติก

สำหรับปั๊มป์แบบเพอริสตอลติกจะทำหน้าที่ป้อนสารละลายยึดเกาะเข้าไปยังหัวฉีด เพื่อผสมกับอากาศให้ออกมาเป็นละอองสารละลายยึดเกาะขนาดเล็ก ประกอบด้วยตัวเครื่องปั๊มป์แบบเพอริสตอลติกซึ่งมีชุดขับ (drive) (Masterlex L/S รุ่น 7554-95), ปั๊มป์ เฮด (pump head) สำหรับดิดตั้งสายยาง (Masterlex L/S รุ่น 7510-12), สายยาง (รุ่น L/S 15) ในรูปที่ 4.7



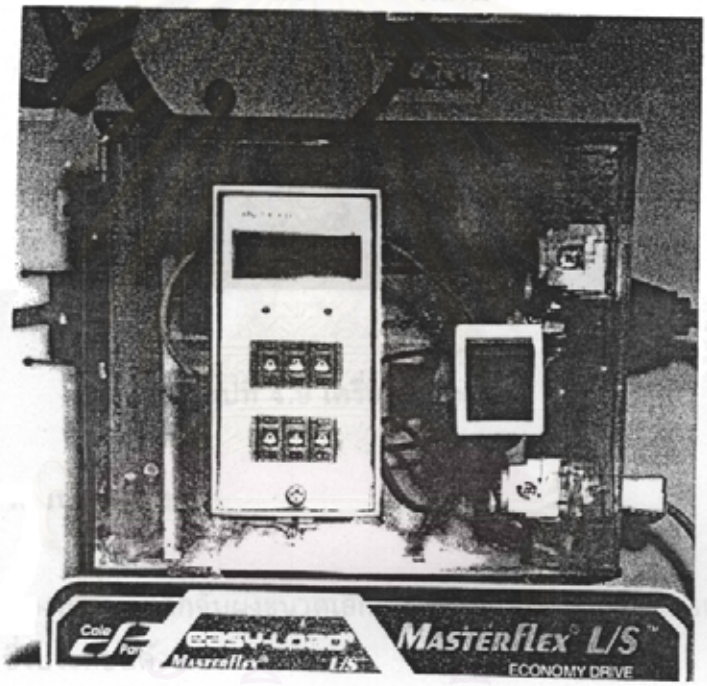
รูปที่ 4.6 หัวฉีด



รูปที่ 4.7 ปั๊มป์แบบเพอริสตอลติก

4.2.9. นาฬิกาตั้งเวลาเปิด-ปิดเป็นจังหวะ

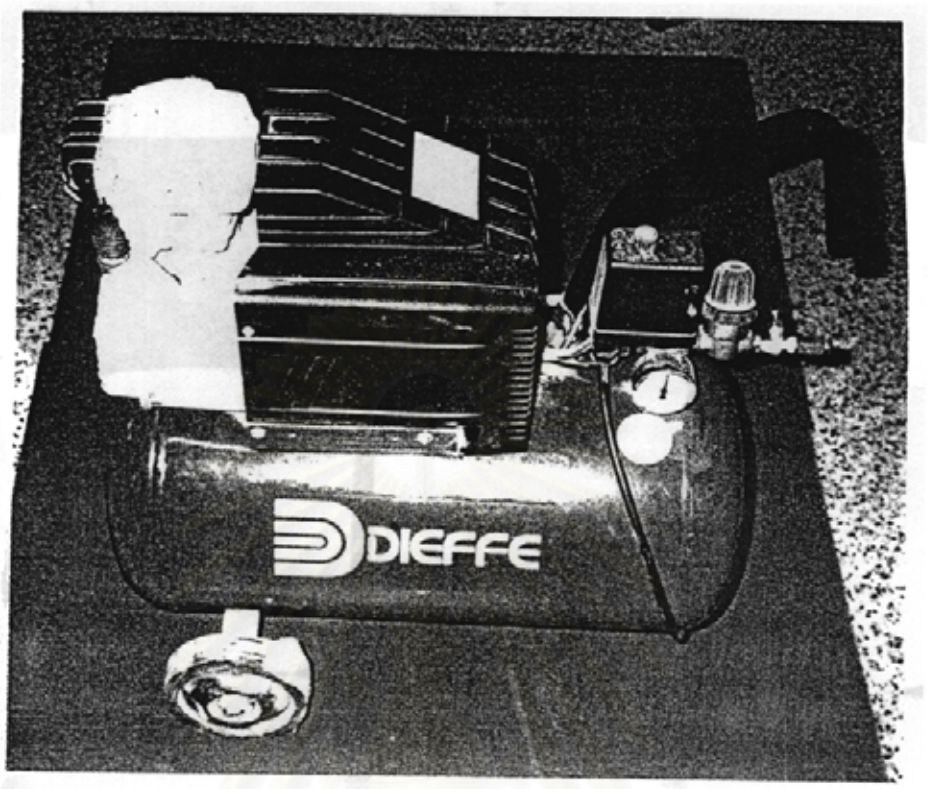
ในการป้อนของสารละลายยึดเกาะเข้าหัวฉีดเพื่อพ่นออกมาเป็นละอองเข้าสู่ภาชนะ ในบางกรณีจำเป็นต้องมีการหยุดให้อนุภาคผงที่เปียกมีการอบแห้งเกิดขึ้นบาง เพื่อให้การบวนการทำแกรนูลเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องติดตั้งนาฬิกาตั้งเวลาเปิด-ปิด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการเวลาทำงานของปั๊มป์แบบเพอริสตอลติก โดยการตัดและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เข้าเครื่องปั๊มป์แบบเพอริสตอลติก สามารถตั้งเวลาเปิด-ปิดได้ 999 วินาที (หรือ 999 นาทีโดยการปรับปุ่มภายในตัวเครื่อง) ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 นาฬิกาตั้งเวลาเปิด-ปิดเป็นจังหวะ

4.2.10. เครื่องอัดอากาศ

เครื่องอัดอากาศใช้สำหรับป้อนอากาศอัดความดันเข้าสู่หัวฉีด ควบคุมให้ความดันที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีค่าสม่ำเสมอโดยติดตั้งวาล์วปรับแรงดัน (regulator gauge) และผ่านโซลินอยด์ วาล์ว (solenoid valve) เพื่อควบคุมการป้อนอากาศให้สอดคล้องกับอัตราการป้อนสารละลายยึดเกาะโดยการควบคุมของนาฬิกาตั้งเวลาเช่นเดียวกับปั๊มป์แบบเพอริสตอลติก รูปที่ 4.9 เป็นภาพของเครื่องอัดอากาศที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.9 เครื่องอัดอากาศ

4.2.11. ระบบถุงกรอง

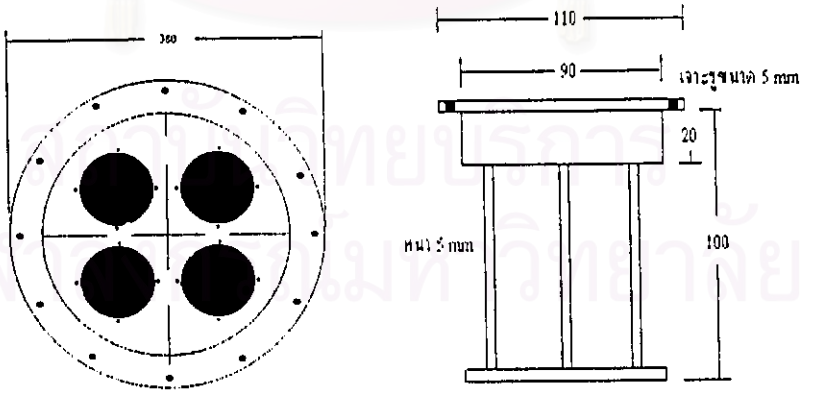
ระบบถุงกรองทำหน้าที่ดักจับผงขนาดเล็กที่มาพร้อมกับอากาศ ให้ออกไปกับอากาศน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย

1. ถุงกรอง (bag filters) เป็นถุงรูปทรงกระบอกทำจากโพลีเอสเตอร์ (polyester) ที่มีรูพรุนขนาด 25 ไมครอน เย็บเป็นถุงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร จำนวน 4 ถุง ดังในรูปที่ 4.10 (ก)

2. โครงถุงกรอง (bag filter supporter) เป็นโครงพยุงไม่ให้ถุงกรองเกิดการยุบตัวเมื่อมีอากาศที่มีแรงดันมากระทบ ทำจากอะคิลิก ดังในรูปที่ 4.10 (ข) แสดงขนาดของโครงถุงกรองที่ทำการออกแบบและรูปที่ 3.10 (ค) เป็นโครงถุงกรองที่สร้างใช้ในการทดลอง

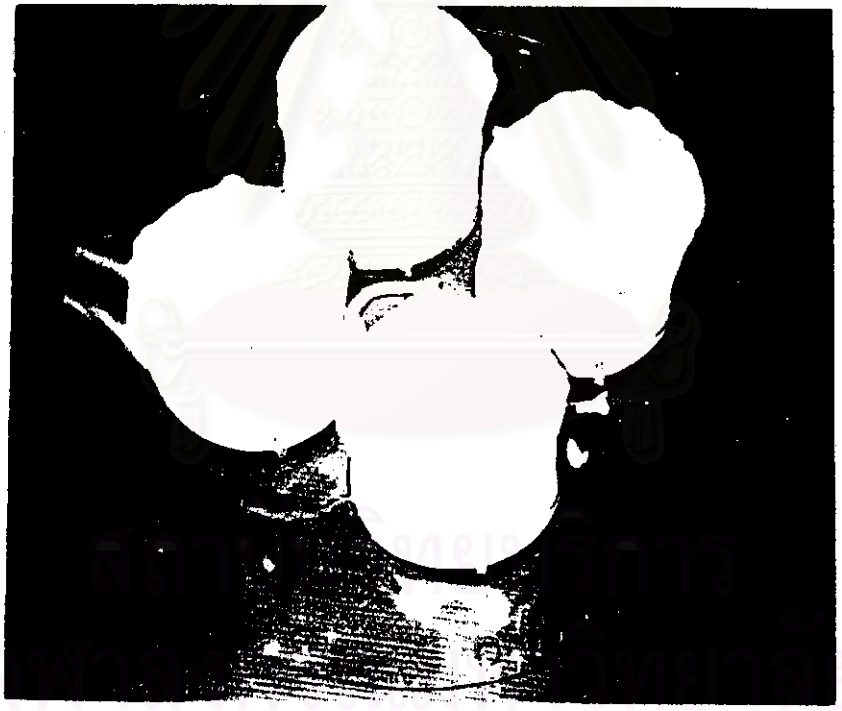
3. แผ่นยึดถุงกรอง (Bag filter holding plate) แผ่นยึดถุงกรองทำหน้าที่ยึดถุงกรองทั้ง 4 ถุง เพื่อที่จะติดตั้งเข้าไปในภาชนะ รูปที่ 3.10 (ง) แสดงลักษณะของแผ่นยึดถุงกรองที่ติดตั้งถุงกรอง

(ก)



(ข)

(ค)



(ง)

รูปที่ 4.10 ระบบถุงกรอง

(ก) ถุงกรอง (ข) แบบโครงถุงกรอง (มิลลิเมตร)

(ค) โครงถุงกรอง (ง) ระบบถุงกรองที่จัดสร้างขึ้น

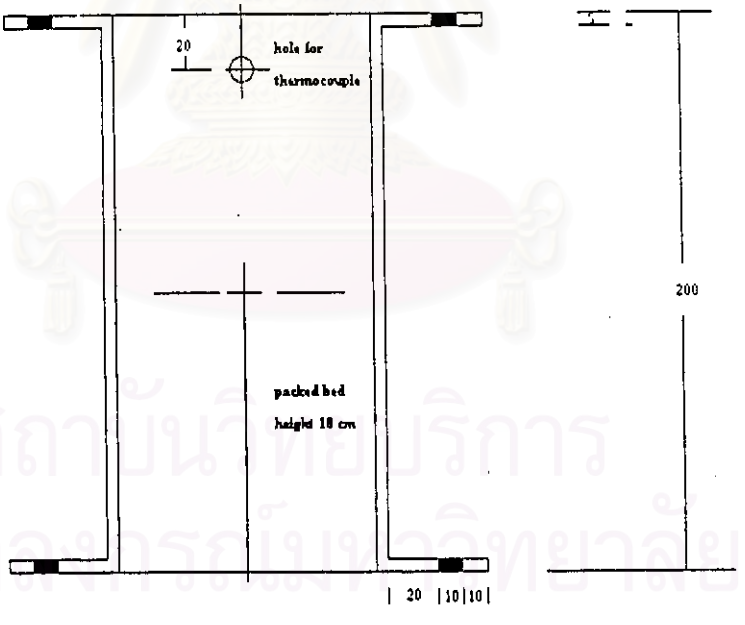
4.2.12. ท่อและวาล์ว

ท่อจะใช้สำหรับการนำอากาศจากเครื่องเป่าอากาศเข้าสู่ส่วนทำความร้อนและภาชนะ ในงานวิจัยนี้ใช้ท่อพีวีซีขนาด 2 นิ้ว ส่วนการควบคุมความเร็วหรืออัตราการไหลของอากาศทำได้โดยการปรับโดยบอลล์วาล์วใน ซึ่งมีบอลล์ 2 ชุดด้วยกันเพื่อควบคุมอากาศที่จะเข้าเครื่องและปล่อยออก (by part) ให้ได้ความเร็วหรืออัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ

4.2.13. ภาชนะเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบด

สำหรับภาชนะเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบด จะประกอบด้วยส่วนประกอบย่อย ๆ ดังนี้คือ

1. ภาชนะที่เตรียมอากาศขาเข้า เป็นส่วนที่ต่อเข้ากับระบบทำความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ดังในรูปที่ 4.11 ภายในบรรจุเม็ดลูกแก้วเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายอากาศอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของภาชนะ และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศที่ไหลอยู่ภายใน



รูปที่ 4.11 แบบภาชนะที่เตรียมอากาศขาเข้า (มิลลิเมตร)

2. ภาชนะบรรจุ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร เพื่อสำหรับบรรจุวัสดุผงที่ต้องการลิดแกรนูล

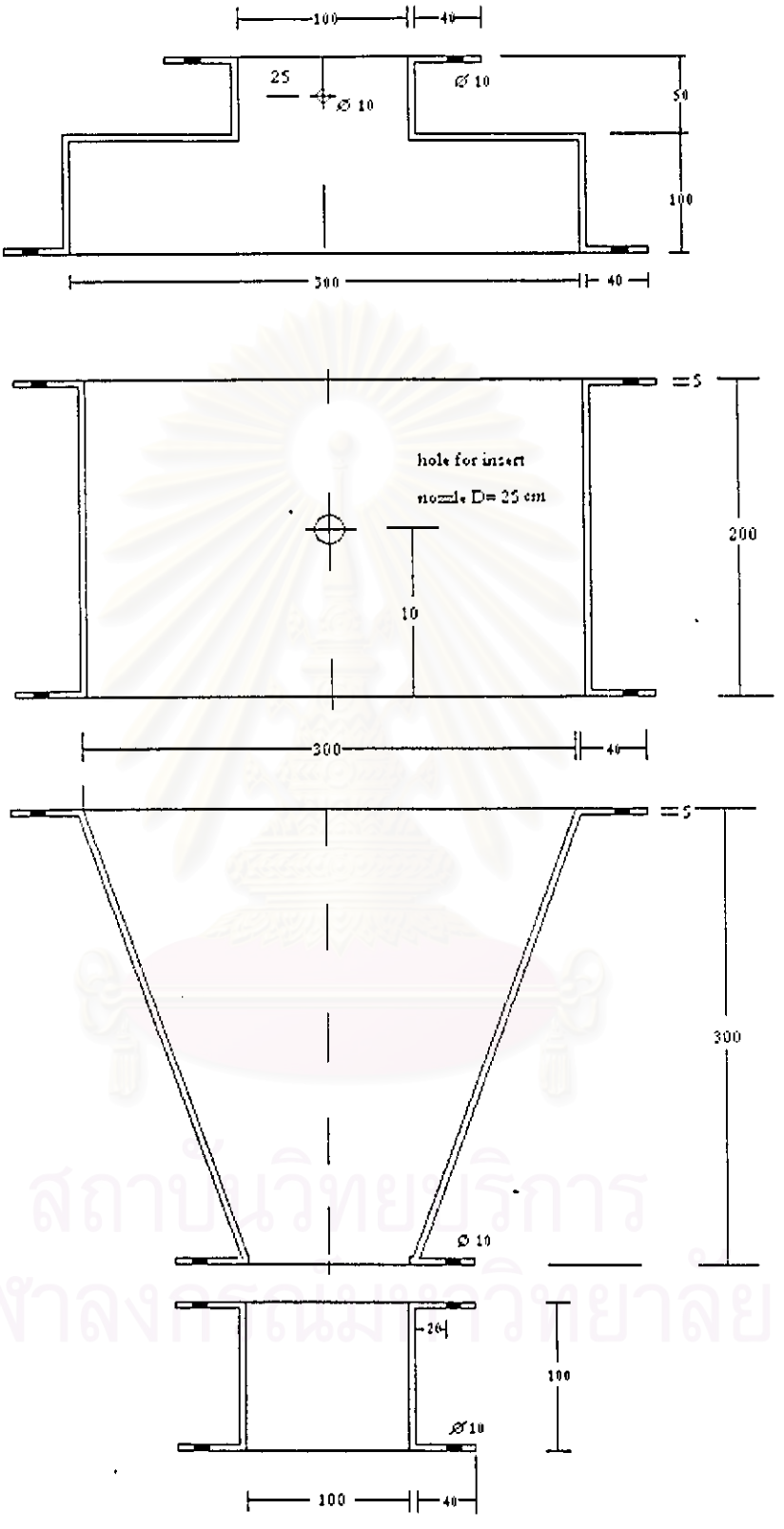
3. แอกซ์แพนชัน ชามเบอร์ มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยสูง 30 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 10 เซนติเมตรและด้านบน 30 เซนติเมตร

4. ส่วนบริเวณติดตั้งหัวฉีด มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และเจาะรูติดตั้งหัวฉีดตรงกึ่งกลาง ด้านบนจะต่อกับระบบถึงกรองและภาชนะที่เตรียมอากาศขาออก

5. ภาชนะที่เตรียมอากาศขาออก มีลักษณะเป็นฝาครอบและบนของฝาครอบมีหน้าแปลนสำหรับต่อกับท่อส่งอากาศ ที่ผนังด้านข้างมีการเจาะรูเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากภาชนะ

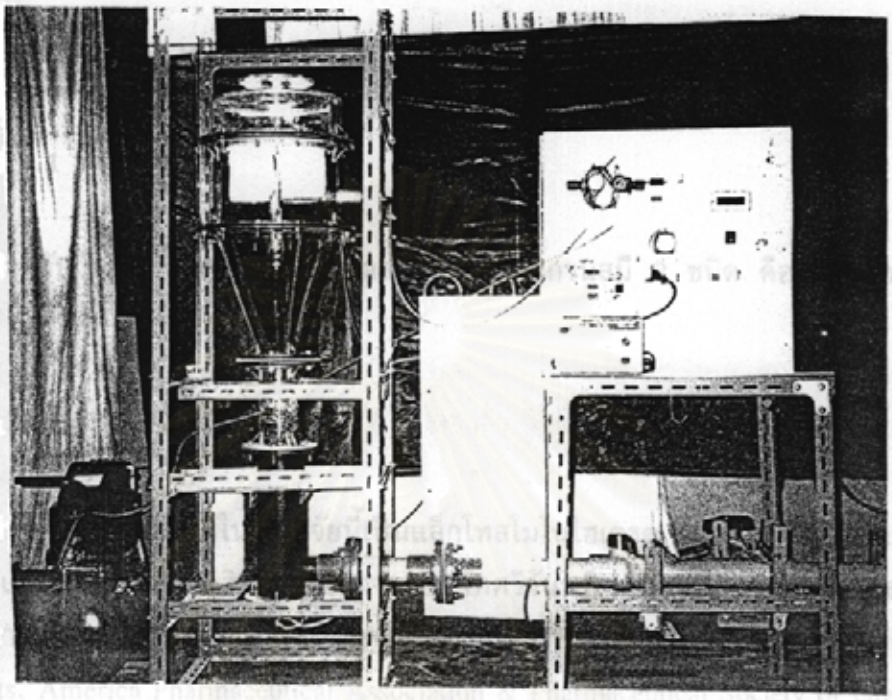
ขนาดของส่วนภาชนะเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดแสดงในรูปที่ 4.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 แบบภาชนะเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบด (มิลลิเมตร)

สำหรับเครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดที่จัดสร้างขึ้น แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 4.13 เครื่องทำแกรนูลโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดที่จัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย