



ที่มาของสมการ Ergun เพื่อการคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอซ์สำหรับอนุภาคของแข็ง Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles

ระวิน สืบคำ^{1*}, ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอานวย², สุนตร สืบคำ³

Rawin Surbkar^{1*}, Thanasit Wongsiriamnuay², Sunate Surbkar²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, ชลบุรี, 20110

¹Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi, 20110

²คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290

²Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiang Mai, 50290

*Corresponding author: Tel: 080-4988144 E-mail: rawin2272@hotmail.com

บทคัดย่อ

ความรู้เกี่ยวกับความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอซ์ในเบดของแข็งจำเป็นสำหรับการออกแบบและการใช้งานระบบฟลูอิดไอซ์ที่มีประสิทธิภาพซึ่งอาจใช้ในกระบวนการผสม การอบแห้ง การแช่เยือกแข็ง หรือหน่วยปฏิบัติการอื่น ๆ ระบบฟลูอิดไอซ์ซึ่งมีประสิทธิภาพต้องการอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้วัสดุภายในเบดมีสถานะสแตติก หรือหลุดลอดออกไปจากเบด บทความวิชาการนี้จึงนำเสนอที่มาของสมการ Ergun ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอซ์ และการหาคุณลักษณะของอนุภาคที่ใช้ประกอบการคำนวณ ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุน และแฟกเตอร์รูปร่าง

คำสำคัญ: ฟลูอิดไอเซชัน, เบดฟลูอิดไอซ์, ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอซ์, สมการ Ergun

Abstract

Knowledge of the minimum fluidizing velocity of solid particles is essential for the effective design and operation of fluidized beds which may be used for mixing, drying, freezing or other processes. A fluidized bed requires correct setting of airflow in order to operate with no material remaining static on the bed and without excessive elution of light materials. This article illustrates the foundation of the Ergun equation used to calculate the minimum fluidizing velocity. Also characteristics of particles used in calculation; namely size, bulk density, voidage or particle porosity and shape factor were represented

Keywords: Fluidization, Fluidized bed, Minimum Fluidizing Velocity, Ergun equation

1 บทนำ

ฟลูอิดไอเซชัน (Fluidization) เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ด โดยที่มีส่วนที่สัมผัสกับของไหลแล้วอนุภาคของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่ของไหลที่ใช้จะถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับอนุภาคของแข็ง แล้วจะไหลผ่านออกทางส่วนบนของหอทดลอง ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Column) หรือเป็นท่อเหลี่ยมแนวตั้ง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดอนุภาคของแข็งจะเริ่มเคลื่อนที่ และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่

เกาะติดกัน ซึ่งอนุภาคของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ฟลูอิดไอเซชันแบ่งตามสถานะของไหลได้ 2 ประเภท คือ

1) ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายถึง ภายในหอทดลองหรือเบด (bed) ที่ใช้งานจะประกอบด้วยสารสองสถานะ คือ ของแข็งและของไหล ของไหลนี้อาจเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะจึงแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภท (Figure 1) คือ ก๊าซฟลูอิดไอเซชัน (Gas fluidization) และฟลูอิดไอเซชันของเหลว (Liquid fluidization)

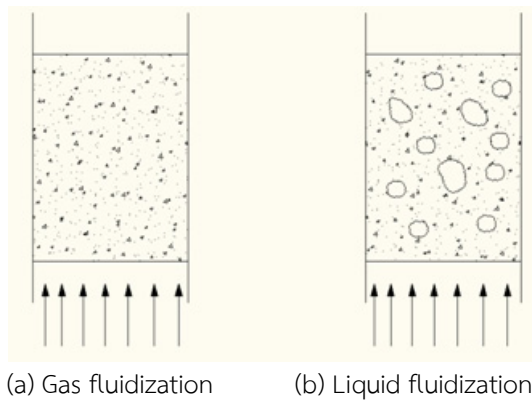


Figure 1 Two types of fluidized bed behavior

2) ฟลูอิดเซชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายถึง ภายในหอทดลองจะประกอบด้วยสสารสามสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งพัฒนามาจากฟลูอิดเซชันสองสถานะของหอทดลองที่เป็นฟอง (Bubble column) และหอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed bed)

ปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันเริ่มจากการใส่ของแข็งในหอทดลอง แล้วปล่อยของไหลให้ไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลอง ขณะที่ของไหลยังมีความเร็วต่ำ อนุภาคของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) ดังแสดงใน Figure 2a ทั้งนี้ ความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity, U) จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidizing velocity, U_{mf}) ถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่า ฟลูอิดเซชันต่ำสุด (Incipient or minimum fluidization) ดังแสดงใน Figure 2b สำหรับฟลูอิดเซชันของเหลว เมื่อเพิ่มความเร็วจนกระทั่งการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของของแข็งจะเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกว่าเบดสม่ำเสมอ (Particulate or smooth fluidization) ดังแสดงใน Figure 2c หากเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปอีก จะไปทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของของไหล เบดลักษณะนี้เกือบจะพาเอาอนุภาคของแข็งออกไปจากหอทดลองจึงเรียกว่าเบดเจือจาง (Diluted phase fluidized bed) หลังจากนั้นหากเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อย อนุภาคของแข็งก็จะหลุดลอย

ออกจากหอทดลองไปซึ่งในลักษณะนี้จะถือเป็นการขนถ่ายแบบใช้ลม (Pneumatic conveyor) ดังแสดงใน Figure 2f หากส่งถ่ายของแข็งด้วยของเหลวก็จะเรียกว่า การขนถ่ายด้วยของเหลว (Hydraulic transport)

ก๊าซฟลูอิดเซชันจะมีลักษณะเบดที่แตกต่างไปจากของเหลว เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดเซชันแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม อีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซเหล่านี้จะแทรกตัวขึ้นมายังผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมานี้จะทำให้อนุภาคของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง โดยบางส่วนของอนุภาคของแข็งจะลอยติดตามฟองก๊าซไปด้วย ลักษณะดังกล่าวทำให้ภายในเบดจะมีการเคลื่อนที่อย่างสุ่มแบบชนิดนี้เรียกว่า เบดวุ่นวาย หรือฟลูอิดเซชันวุ่นวาย (Aggregative or bubbling bed) ดังแสดงใน Figure 2d และ 2e โดยฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และลักษณะของแผ่นกระจายอากาศ โดยลักษณะของฟองก๊าซอาจแบ่งได้ดังนี้

1) Channeling เป็นการเกิดฟองก๊าซจากการผ่านของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะไม่มีเคลื่อนที่

2) Bubbling เป็นการเกิดฟองก๊าซที่เกิดเมื่อความเร็วของของไหลสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันเบด จะทำให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็ง แต่ก๊าซอีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นฟองก๊าซลอยขึ้นมา ซึ่งจะทำให้อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่บนฟองก๊าซไหลจากส่วนบนของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง และนอกจากนี้ มีบางส่วนของอนุภาคของแข็งที่ลอยติดตามฟองก๊าซไปด้วย ลักษณะดังกล่าวทำให้ภายในเบดมีการเคลื่อนที่อย่างสุ่ม

3) Slugging เป็นการเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซจนได้ฟองก๊าซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลอง มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ ทำให้การถ่ายเทมวลสารหรือความร้อนเกิดได้ไม่ทั่วถึงเนื่องจากอนุภาคของแข็งสัมผัสกับก๊าซเป็นเวลาอันสั้นหรือไม่สัมผัสเลยในบางส่วน

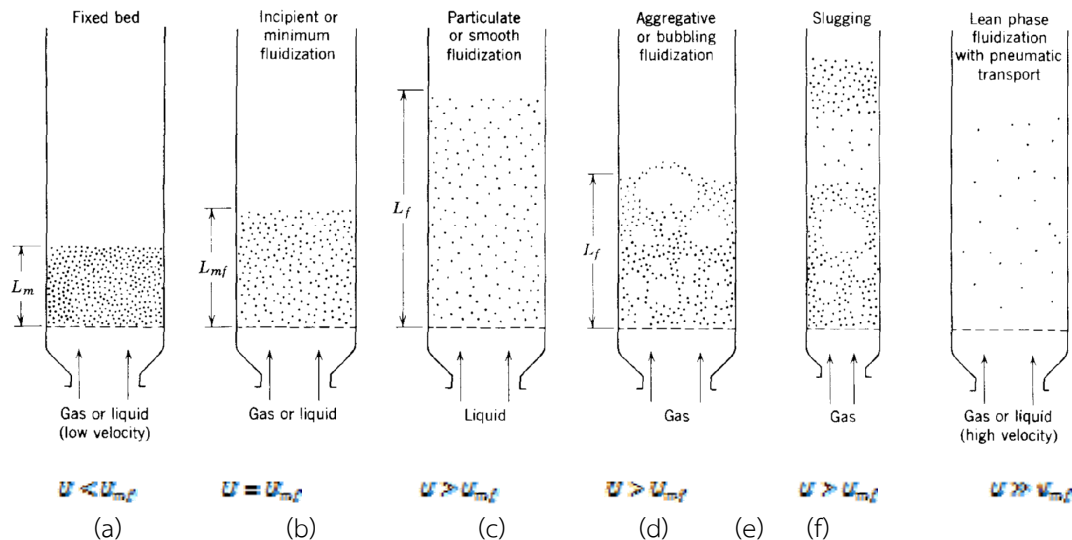


Figure 2 Schematic representation of fluidized beds in different regimes (Kunii and Levenspiel, 1991).

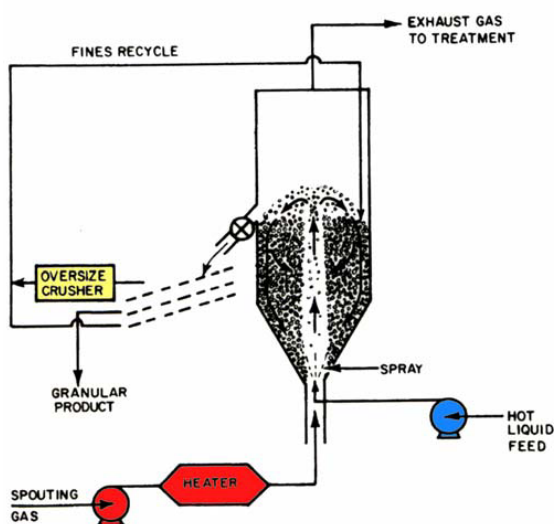


Figure 3 A spouted bed experimental set-up (ปิ่นธร, 2548).

4) Spouted Bed เป็นการที่ก๊าซส่วนใหญ่ไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของอนุภาคของแข็งมากกว่าบริเวณรอบข้างด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณด้านข้าง ลักษณะการไหลแบบนี้คล้ายกับน้ำพุพุ่งแรงตรงกลางแล้วตกลงรอบๆ ข้าง (Figure 3) อนุภาคของแข็งจะถูกฉีดพร้อมกับอากาศความเร็วสูง แล้วไหลขึ้นตรงส่วนกลางของสเปตต์ด้วยสภาวะเบาบาง (Dilute phase) จากนั้นวัสดุจะไหลลงตามผนังด้านข้างด้วยสภาวะหนาแน่น (Dense phase) กลับสู่จุดเริ่มต้นด้านล่างเบตเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ (ปิ่นธร, 2548)

ฟลูอิดเซชันสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากมาย อาทิ การอบแห้ง การแช่เยือกแข็ง เตาผลิตแก๊สชีวมวล เป็นต้น (ไพโรจน์ และศิวัะ, 2555) แต่หนังสือ ตำรา หรือบทความวิชาการเกี่ยวกับฟลูอิดเซชันที่เป็นภาษาไทย ยังมีน้อย บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ นำเสนอการคำนวณพื้นฐานเกี่ยวกับก๊าซฟลูอิดเซชัน ซึ่งแสดงที่มาของสมการ พร้อมกับการคำนวณหาคุณลักษณะของอนุภาคของแข็ง ซึ่งเป็นตัวแปรที่จำเป็นต้องทราบ

2 คุณลักษณะของอนุภาคของแข็ง

การเกิดเบตฟลูอิดเซชันนั้นนอกจากขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งด้วย การออกแบบระบบฟลูอิดเซชันจำเป็นต้องใช้ข้อมูลคุณลักษณะของอนุภาคของแข็ง ดังต่อไปนี้

2.1 ขนาดของชิ้นวัสดุ (Particle size)

เทคนิคในการวัดขนาดของอนุภาคของแข็งมีหลายเทคนิค ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของชิ้นวัสดุ หากชิ้นวัสดุมีขนาดใหญ่กว่า 1 mm และมีขนาดสม่ำเสมอ การวัดขนาดของอนุภาคส่วนมากจะใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูงถึง 0.05 mm แต่หากต้องการทราบค่าที่ละเอียดมากกว่านั้นสามารถวัดด้วยไมโครมิเตอร์ (Micro meter) ความละเอียดสูงถึง 0.001 mm การวัดขนาดของอนุภาคของแข็งควรวัดให้ครอบคลุมทั้งสามด้าน นั่นคือ ด้านที่ยาวที่สุดของอนุภาคของแข็ง หรือด้าน a ด้านที่ตั้งฉากกับด้าน a หรือด้าน b และด้านที่ทำมุมทแยงกับด้าน a กับด้าน b หรือด้าน c

(Figure 4) แล้วแสดงผลของขนาดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric mean diameter, d_p) จำนวนครั้งการวัดควรนำเฉลี่ยซึ่งสามารถระบุได้จากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ค่า SD ยิ่งต่ำยิ่งมีความน่าเชื่อถือ ทั้งนี้ด้าน a ด้าน b และด้าน c ของธัญพืชแต่ละชนิดแสดงใน Figure 4 ค่า d_p หาได้จาก (Mohsenin, 1980)

$$d_p = \sqrt[3]{abc} \quad (1)$$

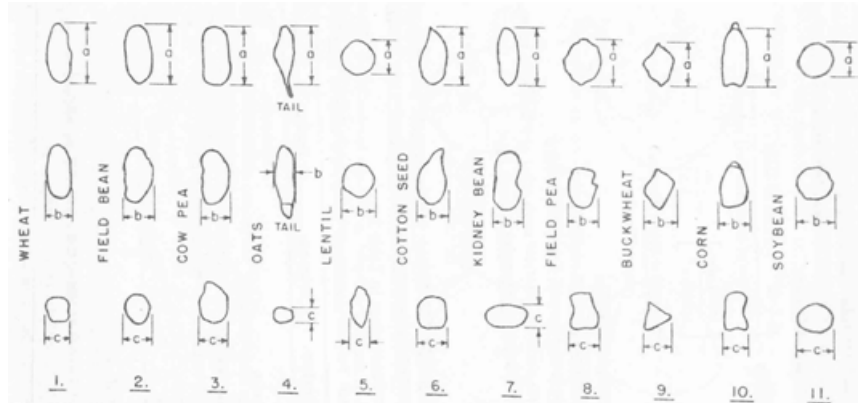


Figure 4 Tracings of shape and designation of the three intercepts for seeds and grains obtained by a photographic enlarger (Mohsenin, 1980).

2.2 รูปร่างของอนุภาค (Particle shape)

การหาขนาดและรูปร่างของอนุภาค (Particle size and shape) ที่มีรูปร่างและขนาดสม่ำเสมอ (Regular particles) เช่น ทรงกลม (Spheres) สี่เหลี่ยมลูกเต๋า (Cubes) เป็นต้น ทำได้ง่าย ๆ แต่ถ้าเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันไม่สม่ำเสมอ (Irregular particles) ซึ่งพบได้ในการลดขนาดวัสดุ การระบุขนาดและรูปร่างที่ชัดเจนจะทำได้ ดังนั้นจึงมักอธิบายรูปร่างในตัวของแฟคเตอร์รูปร่าง (Shape factor or Sphericity) มีนักวิจัยหลายคนที่ใช้วิธีการนี้ในการระบุรูปร่างของธัญพืช อาทิ Dutta *et al.* (1988) ที่ใช้หาขนาดเมล็ดถั่ว Gram (*Cicer arietinum* L.) Olaoeye (2000) ที่ใช้หาขนาดถั่ว Castor, Kaleemullah and Kailappan (2003) ที่ใช้หาขนาดผลพริก เป็นต้น แฟคเตอร์รูปร่างหาได้จาก (Mohsenin, 1980)

$$\phi = \frac{d_i}{d_c} \quad (2)$$

เมื่อ ϕ คือ แฟคเตอร์รูปร่าง (dimensionless), d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมเล็กที่สุดในอนุภาคของแข็ง (mm) และ d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมใหญ่ที่สุดในอนุภาคของแข็ง (mm)

เมื่อ d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเรขาคณิตของอนุภาคของแข็ง (mm), a คือ ด้านที่ยาวที่สุดของชิ้นวัสดุ (mm), b คือ ด้านที่ตั้งฉากกับด้าน a (mm) และ c คือ ด้านที่ทำมุมฉากกับด้าน a กับด้าน b (mm)

หากอนุภาคของแข็งมีขนาดปานกลาง หรือมีขนาดและรูปร่างไม่สม่ำเสมอ มักนิยมใช้เทคนิคตะแกรงร่อนในการหาขนาดเฉลี่ยของชิ้นวัสดุตามวิธีของ ASABE Standards (2008)

ต่อมาได้มีการพัฒนาสมการใหม่เพื่อหาค่าแฟคเตอร์รูปร่าง ซึ่ง Gupta and Das (1997) ใช้หาขนาดเมล็ดทานตะวัน Selvi *et al.* (2006) ใช้หาขนาดเมล็ดลินซีด (Linseed) Unal *et al.* (2008) ใช้หาขนาดเมล็ดถั่วเขียว

$$\phi = \frac{(acb)^{1/3}}{a} \quad (3)$$

Olajide and Ade-Omowaye (1999) ได้พัฒนาสมการหาแฟคเตอร์รูปร่างจากอัตราส่วนของปริมาตรของของแข็งกับปริมาตรของทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่าดังนี้

$$\phi = \left[\frac{\left(\frac{\pi}{6} \right) abc}{\left(\frac{\pi}{6} \right) a^3} \right]^{1/3} = \left[\frac{bc}{a^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

2.3 ช่องว่างของวัสดุ (Voidage or particle porosity)

อนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ในเบตไม่ว่าจะบรรจุอย่างเป็นระเบียบหรือแบบไม่เป็นระเบียบ (Random packing) ก็ตามย่อมเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งขึ้นเสมอ จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและขนาดของอนุภาคของแข็ง หาก

อนุภาคของแข็งมีผิวราบเรียบมักไม่เป็นปัญหามากนัก แต่ถ้าเป็นอนุภาคของแข็งที่มีรูพรุน (Pore) อยู่ภายในด้วยแล้ว การหาปริมาณของช่องว่างที่แท้จริงย่อมกระทำได้อย่างยากมาก เพราะขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กมาก วัดได้เป็นหน่วยของไมครอน (Microns) ยกตัวอย่างเช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) อลูมินากัมมันต์ (Activated alumina) ดินกัมมันต์ (Activated clay) ถ่านโค้ก (Coke) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบช่องว่างที่เป็นรูพรุนกับช่องว่างระหว่างเม็ด (Voidage) แล้ว อย่างแรกมีค่าน้อยกว่าอย่างหลังมากจนไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ ช่องว่างของวัสดุภายในเบตนี้หาได้จาก

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{m_p}{\rho_p} \times \frac{\rho_B}{m_p} \right) = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_p} \quad (5)$$

เมื่อแทนค่า ρ_B ซึ่งได้แก่อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร จะได้

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\rho_p LA} \quad (6)$$

เมื่อ ε คือ ช่องว่างของวัสดุในเบตนี้ (dimensionless), ρ_B คือ ความหนาแน่นปรากฏของวัสดุ (kg/m^3), ρ_p คือ ความหนาแน่นที่แท้จริงของวัสดุ (kg/m^3), m_p คือ มวลของอนุภาคทั้งหมดในเบต (kg), A คือ พื้นที่หน้าตัดของเบต (m^2) และ L คือ ความสูงของเบตวัสดุ (m)

3 ช่องว่างของวัสดุในเบตฟลูอิดซ์

ระบบฟลูอิดเซชันพื้นฐานประกอบไปด้วย เบต (Bed) แผ่นกระจายของไหล (Distributor) ห้องพัสลม (Plenum) และแหล่งกำเนิดลม (Blower) เบตเป็นพื้นที่ของอนุภาคของแข็งในหอทดลองทั้งหมดตั้งแต่แผ่นกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของอนุภาคของแข็ง (Figure 5)

ที่ความเร็วของของไหลคงที่ค่าหนึ่ง ความสูงของเบตตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของคอลัมน์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่าความพรุนของเบตจะแปรผันตามความสูงของเบต ดังนี้

$$\varepsilon_{mf} = \frac{(L - L_0)}{L} = 1 - \frac{L_0}{L} \quad (7)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบตสองสถานะ (เบตนิ่ง และเบตฟลูอิดซ์) ทำให้สามารถคำนวณหาความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ได้จาก

$$L_{mf} = L_0 \frac{(1 - \varepsilon)}{(1 - \varepsilon_{mf})} \quad (8)$$

เมื่อ ε_{mf} คือ ช่องว่างของวัสดุในเบตฟลูอิดซ์ (dimensionless), L_{mf} คือ ความสูงต่ำสุดของเบตที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (m), L_0 คือ ความสูงของอนุภาคของแข็งในเบตนิ่ง (m) และ L คือ ความสูงของอนุภาคของแข็งในเบตฟลูอิดซ์ (m)

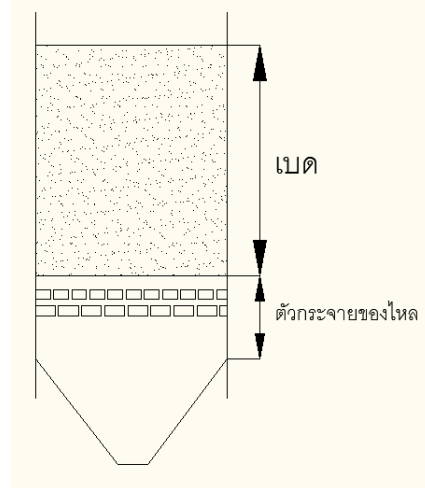


Figure 5 Fluidized bed height.

4 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidizing velocity)

4.1 การใช้สมการหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

ในขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า อนุภาคของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวอนุภาคของแข็งเองกับแรงพยุงจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล ดังนี้

$$\text{แรงพยุงวัสดุของแข็ง} = \text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง} \quad (9)$$

หรือ

$$\text{ความดันตกคร่อมเบต \times พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์} =$$

$$\text{ปริมาตรของวัสดุภายในเบต \times น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง} \quad (9')$$

เมื่อ ΔPA คือ แรงพยุงวัสดุของแข็ง (N), $(1 - \varepsilon_{mf})AL_{mf}$ คือ ปริมาตรของวัสดุของแข็งทั้งหมดโดยไม่รวมช่องว่าง (m^3), $(\rho_p - \rho_f)g$ คือ น้ำหนักจำเพาะของวัสดุของแข็งภายในเบต (N/m^3) และ $(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)AL_{mf}g$ คือ น้ำหนักของวัสดุของแข็งภายในเบต (N)

สมการ (9) เขียนใหม่ได้เป็น (Kunii and Levenspiel, 1991; Gidaspow, 1994; Yang, 1999)

$$\Delta PA = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)AL_{mf}g \quad (10)$$

จัดระเบียบสมการ (10) ใหม่ จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมต่อความสูงของเบตกับน้ำหนักของวัสดุของแข็งที่เริ่มทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ดังนี้ (Kunii and Levenspiel, 1991; Yang, 1999; Smith, 2007)

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \quad (11)$$

เมื่อ ΔP = ความดันตกคร่อมเบตวัสดุ (N/m^2), A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของเบต (m^2), L_{mf} คือ ความสูงต่ำสุดของเบตที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (m), ε_{mf} คือ ช่องว่างภายในเบต (dimensionless), ρ_p คือ ความหนาแน่นที่แท้จริงของอนุภาคของแข็ง (kg/m^3), ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) และ g = ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันโดยการจำลองสภาวะการทำงานทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากความพรุน

ของวัสดุในเบตฟลูอิดเซชันมีค่าไม่คงที่และไม่แน่นอน นอกจากนี้วัสดุยังมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและไม่แน่นอน แต่อย่างไรก็ตามมีสมการหลายสมการที่ใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน สมการที่นิยมใช้คือสมการ Ergun ซึ่งเป็นสมการแบบกึ่งเอมพิริคัล (Semi-empirical equation) ซึ่งปรับปรุงมาจากสมการของ Blake-Kozeny ที่ใช้สำหรับค่าเรย์โนลด์น้อยกว่า 10 และสมการของ Burke-Plummer ที่ใช้สำหรับค่าเรย์โนลด์มากกว่า 1,000 Figure 6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์ความเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ที่ได้มาจากการทดลองที่สามารถนำมาใช้ได้ทั้งช่วงความเร็วต่ำและความเร็วสูง หรือสำหรับการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ตลอดจนช่วงเปลี่ยนแปลงการไหล จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น (Ergun, 1952; Bird, 1960; Ibarz and Barbosa-Canovas, 2003)

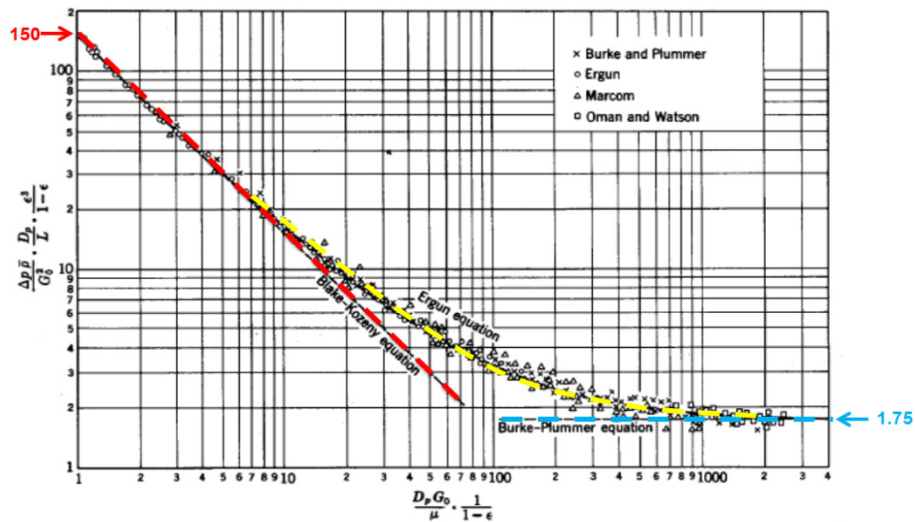


Figure 6 the correlation between Ergun and Blake-Kozeny at $Re < 10$; Ergun and Burke-Plummer equation at $Re > 1,000$ (adapted from Bird, 1960).

$$f_p = \frac{150}{Re_p} + 1.75, \quad 1 \leq Re_p \leq 1,000 \quad (12)$$

นอกจากนั้นจะพบว่าค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานยังเป็นฟังก์ชันของความดันตกคร่อมเบตและความสูงของเบตและความเร็วตั้งสมการ (13) (Bird et al., 2002; Ibarz and Barbosa-Canovas, 2003)

$$f_p = \frac{\Delta P}{L} \frac{d_p}{\rho_f U_{mf}^2} \left(\frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \right) \quad (13)$$

เมื่อ f_p คือ แฟคเตอร์ความเสียดทานในเบตของอนุภาคของแข็ง (dimensionless), Re_p คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาค (dimensionless), ΔP คือ ความดันตกคร่อมเบต (N/m^2), L คือ ความสูงของเบตของอนุภาคของแข็ง (m), d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุที่เป็นของแข็ง (m), ε คือ ช่องว่างภายในเบต (dimensionless), U_{mf} คือ ความเร็วของอากาศที่พัดผ่านเบต (m/s) ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรกับพื้นที่หน้าตัดของเบต และ ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาคหาได้จาก

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_p U_m d_p}{\mu} \quad (14)$$

แทนค่าสมการ (14) ในสมการ (12) แล้วให้สมการ (12) เท่ากับสมการ (13) จะได้สมการ (15) สำหรับทำนายการสูญเสียพลังงานในการไหลผ่านเบตต่อความสูงของเบตซึ่งประกอบไปด้วยสองเทอมคือ ผลเนื่องมาจากความหนืดของของไหล (Viscous effect) และเนื่องจากพลังงานจลน์ (Kinetic effect) (Kunii and Levenspiel, 1991; McCabe et al., 2005; Smith, 2007) จากสมการ (15) ชี้ให้เห็นว่าความดันสูญเสียจะขึ้นกับช่องว่างภายในเบต (ϵ_{mf}) เป็นอย่างมาก ทั้งนี้วัสดุทรงกลมจะมีค่า ϵ_{mf} ประมาณ 0.37 - 4.0 ส่วนวัสดุทรงกระบอกจะมีค่า ϵ_{mf} ประมาณ 0.35 (McCabe et al., 2005) และหากวัสดุมีรูปร่างไม่แน่นอนต้องคิดค่าแฟคเตอร์รูปร่าง (ϕ) เข้าไปด้วย ทำให้พลังงานสูญเสียยิ่งมีค่ามากขึ้นไปด้วย (Kunii and Levenspiel, 1991; Ibarz and Barbosa-Canovas, 2003; McCabe et al., 2005; Green and Perry, 2008) สำหรับการไหลในช่วงขณะเกิดการเปลี่ยนแปลง (Transition flow) ที่มีความเร็วสูงกว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) แต่ความเร็วยังไม่สูงมากพอที่จะเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) สามารถใช้สมการ (15) ในการคำนวณหาความดันตกคร่อมเบตได้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = \frac{150(1-\epsilon_{mf})^2 \mu U_{mf}}{\epsilon_{mf}^3 \phi^2 d_p^2} + \frac{1.75(1-\epsilon_{mf}) \rho_f U_{mf}^2}{\epsilon_{mf}^3 \phi d_p} \quad (15)$$

การฟลูอิดซ์ด้วยความเร็วต่ำ ที่เป็นการไหลแบบราบเรียบเหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นผงละเอียดซึ่งขนาดอนุภาคเล็กมาก หรือ $d_p \leq 0.1 \text{ mm}$, $\text{Re}_p \leq 10$ สามารถตัดเทอมที่สองในสมการ (15) ออกได้ เนื่องจากการไหลที่ความเร็วต่ำๆ หรือในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ความหนืดของของไหลจะมีผลต่อการไหลเป็นอย่างมาก ดังสมการ (16) ของ Kozeny-Carman (Ibarz and Barbosa-Canovas, 2003; McCabe et al., 2005; Green and Perry, 2008)

$$f_p = \frac{150}{\text{Re}_p}, 1 \geq \text{Re}_p \geq 1,000 \quad (16)$$

จะได้สมการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดซ์เซชันสำหรับการฟลูอิดซ์ที่ความเร็วต่ำและวัสดุมีขนาดเล็กมาก ๆ

ดังสมการ (17) โดย Gupta et al. (2009) ใช้คำนวณความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดซ์กากแร่ละเอียด

$$U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 (\rho_s - \rho_f)}{150 \mu} g \left(\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right), 1 \leq \text{Re}_p \leq 1,000 \quad (17)$$

สำหรับการฟลูอิดซ์ด้วยความเร็วสูง ที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งเหมาะสมกับวัสดุที่เป็นชิ้นหรือเป็นเม็ดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ หรือ $d_p \geq 0.1 \text{ mm}$ สามารถตัดเทอมที่หนึ่งในสมการ (15) ได้เพราะความหนืดมีผลน้อยกว่าความเฉื่อย ตามสมการ (18) ของ Burke-Plummer (Ibarz and Barbosa-Canovas, 2003; McCabe et al., 2005; Green and Perry, 2008)

$$f_p = 1.75, \text{Re}_p \geq 1,000 \quad (18)$$

จะได้สมการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันสำหรับการฟลูอิดซ์ที่ความเร็วสูง และวัสดุมีขนาดใหญ่เป็นชิ้น ๆ ดังสมการ (19) ซึ่ง ชริน (2547) ใช้คำนวณความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดซ์เมล็ดข้าวโพด กิตติและกิตติชัย (2547) ใช้คำนวณความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดซ์พริก (*Capsicum anum* Linn)

$$U_{mf}^2 = \frac{(\phi d_p) (\rho_s - \rho_f)}{1.75 \rho_f} g \epsilon_{mf}^3, \text{Re}_p \geq 1,000 \quad (19)$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันตกคร่อมเบตต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (N/m^2), L_{mf} คือ ความสูงของเบตที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดเซชัน (m), U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดของเบตที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (m/s), ρ_s คือ ความหนาแน่นที่แท้จริงของของแข็ง (kg/m^3), ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3), μ คือความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล (Pa.s), d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (m), ϕ คือ แฟคเตอร์รูปร่าง (dimensionless), ϵ_{mf} คือ ช่องว่างภายในเบตต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (dimensionless) และ g คือความเร่งอันเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

Figure 7 แสดงให้เห็นช่วงของการเกิดการสูญเสียพลังงานในการไหลผ่านเบตต่อความสูงของเบตในช่วงเบตนิ่งซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (15) แต่หากเป็นเบตฟลูอิดซ์สามารถใช้ทั้งสมการ (11) และ (15)

4.2 การทดลองเพื่อหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันสามารถหาได้จากการทดลองเมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตฟลูอิดซ์กับความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity, U_{mf}) ดังแสดงใน Figure 8 โดยกำหนดจากจุดตัดระหว่างเส้นแนวโน้มในช่วงเบตนิ่งที่ความดันตกคร่อมเบตจะแปรผันตรงกับความเร็วในการไหลตามผิวกับเส้นแนวโน้มในช่วงเบตฟลูอิดซ์ ซึ่งความดันตกคร่อมเบตจะค่อนข้างคงที่เมื่อวัสดุเริ่มเกิดการฟลูอิดเซชันเนื่องจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็งถูกรองรับโดยกระแสของไหล (Kunii and Levenspiel, 1991; Gidaspow, 1994; Smith, 2007)

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจริงที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเบี่ยงเบนไปจากที่ได้จากสมการร้อยละ 59.6 เมื่อฟลูอิดซ์เมล็ดข้าวโพด (จิรเมธา, 2549) ร้อยละ 5 - 38 เมื่อฟลูอิดซ์ glass beads ขนาด 4 และ 5 mm (ศิลาพันธุ์ และคณะ, 2546) โดยความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันแปรผันตามอุณหภูมิของเบตที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่เกินอุณหภูมิการสintering ของ glass beads ขนาด 0.84 - 1.5 mm (Guo et al., 2004) โดยขนาดอนุภาคยิ่งใหญ่อค่าเบี่ยงเบนยิ่งน้อย (10 - 100 μm) ในทางกลับกันอนุภาคยิ่งเล็กราค่าเบี่ยงเบนยิ่งสูง (6 μm) แสดงว่าสมการ Ergun เหมาะสมที่สุดกับอนุภาคกลุ่ม A (Geldart group A) แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้ได้กับอนุภาคกลุ่ม C (Geldart group C) ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ 10 μm ขึ้นไป (Mawatari et al., 2003)

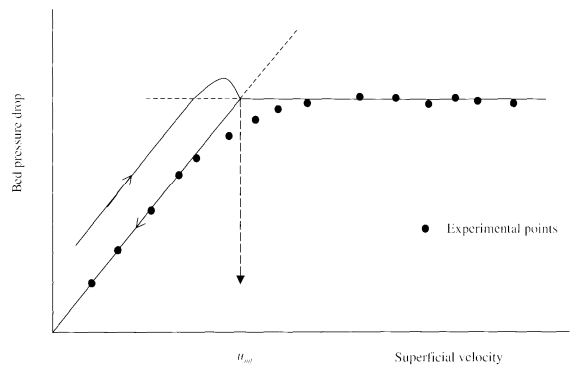


Figure 8 U_{mf} determination from the experimental data (Smith, 2007).

5 บทสรุป

ระบบฟลูอิดเซชันที่มีประสิทธิภาพต้องการอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้วัสดุภายในเบตมีสภาวะสแตติกหรือหลุดลอดออกไปจากเบต ดังนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบตฟลูอิดซ์จึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบระบบ โดยสมการ Ergun ซึ่งเป็นสมการแบบกึ่งเอมพิริคัล (Semi-empirical equation) เป็นสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบตฟลูอิดซ์ซึ่งต้องทราบคุณลักษณะของอนุภาคของแข็ง อาทิ ขนาดของชิ้นวัสดุ รูปร่างของอนุภาค และช่องว่างของวัสดุ สมการนี้ประกอบไปด้วยสองเทอมคือ การสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากความเสียดทานกับของไหล (Viscous drag) และเนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานจลน์ (Kinetic losses) นอกจากนี้ยังหาได้จากการทดลองเมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตฟลูอิดซ์กับความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity)

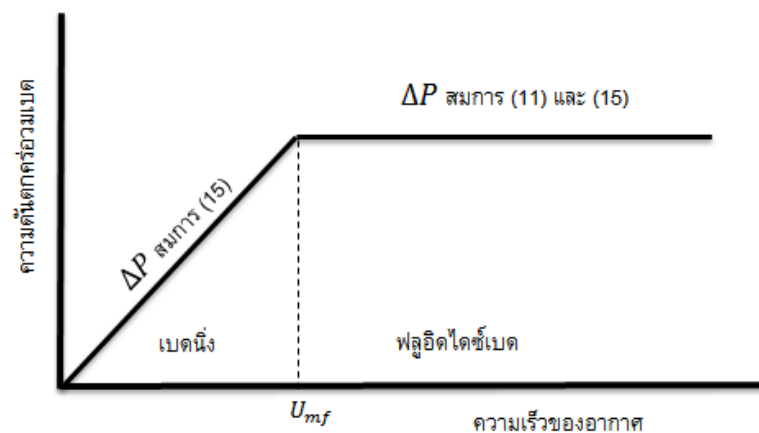


Figure 7 Comparison of the use of equations for determining the pressure drop across the bed.

6 กิตติกรรมประกาศ

คุณูปการจากบทความฉบับนี้ ขอมอบให้คณาจารย์ทุกท่านที่
ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้เขียน ขอขอบคุณเจ้าของผลงาน
ทุกท่านที่ผู้เขียนใช้อ้างอิงในการเขียนบทความฉบับนี้

7 เอกสารอ้างอิง

- กิตติ สติธิประภาพร และกิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย. 2547.
คุณลักษณะการอบแห้งพริกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด. การ
ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น.
- จิรเมธา สังข์เกษม. 2549. การเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งเมล็ด
ข้าวโพดโดยใช้ฮีตเตอร์เป็นความร้อนเสริมในฟลูอิดไดซ์เบดที่
ใช้ฮีตปั๊ม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัด
นครราชสีมา.
- ชริน สังข์เกษม. 2547. การศึกษาฟลูอิดไดซ์เซชันโดยใช้ความร้อน
จากชุดคอนเดนเซอร์เพื่อใช้ในระบบการอบแห้ง. ใน การ
ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น.
- ปณณธร ภัทรสถาพรกุล. 2548. การทำให้เป็นเม็ดด้วยวิธีแช่
เยือกแข็ง. *วารสารสมาคมเครื่องทำความเย็นไทย* 14, 15-18.
- ไพโรจน์ จันทร์แก้ว และศิวัช อัจฉริยวิริยะ. 2555. บทวิเคราะห์
การอบแห้งธัญพืชโดยประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด. ใน
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 13, 4-5 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงใหม่.
- ศิลาพันธุ์ ประทุมทิพย์, สมิต์ เอี่ยมสอาด และวิษณุ มีอยู่. 2546.
การศึกษาการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์
เบดแบบสองสถานะที่มีการปรับเปลี่ยนแผ่นกระจาย.
วิศวกรรมสาร ม.ช. 30(3): 261-273.
- ASABE Standards. 2008. Method of determining and
expressing fineness of food materials by sieving.
ASAE S319.4 FEB2008. St. Joseph, Mich. ASAE.
- Bird, R. B. 1960. Transport phenomena. New York,
Wiley.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. 2001. Transport
phenomena, 2nd Ed., Wiley, New York.
- Dutta, S.K., Nema, V.K. and Bhardwaj, R.K. 1988. Physical
properties of gram. *J. agric. Engng Res.* 39, 259-268.
- Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns.
Chemical Engineering Progress 48(2): 89-94.
- Gidaspow, D. 1994. Multiphase flow and fluidization :
continuum and kinetic theory descriptions. Boston,
Academic Press.
- Green, D. W. and Perry, R. H. 2008. Perry's chemical
engineers' handbook, 8th Ed. McGraw-Hill.
- Guo, Q., Suda, T., Sato, J. C. and Yue, G. 2004.
Agglomeration behavior in a bubbling fluidized bed
at high temperature. *Chem. Eng. Comm.*, 191, 1329-
1342.
- Gupta, R.K. and Das, S.K. 1997. Physical properties of
sunflower seeds. *J. agric. Engng Res.* 66: 1-8.
- Ibarz, A. and Barbosa-Canovas, G. V. 2003. Unit
operations in food engineering. Boca Raton, CRC
Press.
- Kaleemullah, S. and Kailappan, R. 2003. Geometric and
morphometric properties of chillies. *International
J. of Food Properties* 6(3), 481-498.
- Kunii, D. and Levenspiel, O. 1991. *Fluidization
engineering*. New York and London: Wiley & Sons., Inc.
534 pp.
- Mawatari, Y., Tatemoto, Y. and Noda, K. 2003. Prediction
of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized
bed. *Powder Technology* 131: 66–70.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. 2005. Unit
operations of chemical engineering. Boston, Mass.,
McGraw-Hill.
- Mohsenin, N.N. 1980. *Physical properties of plant and
animal material*, 3rd revised and updated Ed. Gordon
and Breach Science Publishers: AW Amsterdam, the
Netherlands.
- Olajide, J.O. and Ade-Omowaye, B.I.O. 1999. Some
physical properties of locust bean seed. *J. agric.
Engng Res.* 74, 213-215.
- Olaoye, J.O. 2000. Some physical properties of castor nut
relevant to the design of processing equipment. *J.
agric. Engng Res.* 77(1), 113-118.

- Perry, R. H., Green, D. W. and Maloney, J.O. 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill. 2640 p.
- Selvi, S.Ç., Pinar, Y. and Yesiloglu, E. 2006. Some physical properties of linseed. *Biosystems Engineering* 95(4): 607-612.
- Smith, P.G. 2007. *Applications of fluidization to food processing*. Oxford: Blackwell Science.
- Unal, H., Isik, E., Izli, N. and Tekin, Y. 2008. Geometric and mechanical properties of mung bean (*Vigna radiate* L.) grain: effect of moisture. *International J. of Food Properties* 11: 585-599.
- Yang, W.C. 1999. Fluidization, solids handling and processing : industrial applications. Westwood, N.J., Noyes.