

บทที่ 4

แบบจำลองการเคลื่อนที่สำหรับอนุภาคในทางเดินหายใจ

การศึกษาและทำความเข้าใจในพฤติกรรมของอนุภาคในทางเดินหายใจเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการพ่นยาอย่างยิ่ง ซึ่งในปัจจุบันการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านเวลาและค่าใช้จ่ายต่างๆ ในบทนี้จึงได้เสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่สำหรับอนุภาคในทางเดินหายใจภายใต้สภาวะการไหลของอากาศ โดยได้สร้างแบบจำลองที่อาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ประยุกต์เข้าด้วยกัน ทั้งเรื่องแรงที่กระทำต่อวัตถุและการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาค ผลที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์แนวทางการเคลื่อนที่และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคภายในทางเดินหายใจ

การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่สำหรับอนุภาคในทางเดินหายใจ

เนื่องจากจุดประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้ คือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของอนุภาคในทางเดินหายใจ หลังจากการฉีดพ่นยาผ่านทางช่องปาก โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาค เพื่อศึกษาว่าอนุภาคแต่ละอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลไกลแค่ไหน และยึดเกาะที่ตำแหน่งใดบนผนังทางเดินหายใจ ถ้ากำหนดให้ แต่ละครั้งของการพ่นยา มีอนุภาคทั้งหมด N อนุภาค และถือว่าแต่ละอนุภาคมีมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันได้ โดยตั้งสมมติฐานว่า ไม่เกิดการชนซึ่งกันและกันระหว่างอนุภาค ซึ่งเมื่อจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาคไปจนครบ N ครั้ง จะได้แนวทางการเคลื่อนที่และตำแหน่งการยึดเกาะของอนุภาคทุกๆอนุภาคสำหรับการฉีดพ่นยาแต่ละครั้ง จึงสามารถวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของตำแหน่งการยึดเกาะบนผนังทางเดินหายใจของอนุภาคทั้งหมด ที่ถูกฉีดพ่นในแต่ละครั้งได้ เนื่องจากแบบจำลองที่จะนำเสนอเป็นแบบจำลองสำหรับอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคหนึ่งอนุภาค ดังนั้นจะอาศัยเทคนิคแบบการกระจายตัวกระจายวิภาคแบบลากรางจ์ (Lagrangian dispersed phase techniques) สำหรับการสร้างแบบจำลอง

เราจะเริ่มต้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาค โดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์เบื้องต้น คือ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของอนุภาคที่

มีมวล m ภายใต้สภาวะที่มีแรงเสียดทานของอากาศ [25] สำหรับการเคลื่อนที่นั้นจะสนใจเฉพาะตำแหน่งของอนุภาคในแนวตั้ง ดังนั้นความเร็วและความเร่งที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งแรงต่างๆที่กระทำกับอนุภาคจะถูกพิจารณาในแนวตั้งเท่านั้น ซึ่งเปรียบเสมือนว่ากำลังศึกษาการเคลื่อนที่ในหนึ่งมิติ

ถ้ากำหนดให้ $x^p(t)$ และ $v(t)$ แทนตำแหน่ง และความเร็วของอนุภาค ณ ขณะเวลาใดๆ ตามลำดับ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$v(t) = \frac{dx^p(t)}{dt}$$

ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีแรงเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้องนั้น แรงที่กระทำต่ออนุภาคแต่ละอนุภาคจะประกอบด้วยสองส่วน คือ แรงที่เป็นน้ำหนักของอนุภาคซึ่งเกิดจากแรงโน้มถ่วง และแรงที่เกิดจากแรงเสียดทานที่มีต่ออนุภาค **จากกฎข้อที่สองของนิวตัน**

$$F = ma$$

สำหรับค่า F ทางซ้ายมือ คือ แรงที่กระทำต่ออนุภาค ซึ่งมีหน่วยเป็น นิวตัน (N) โดยที่ $1 N = 1 kg \cdot m/s^2$ ส่วนทางด้านขวา a คือ ความเร่งของอนุภาค ซึ่งมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที² (m/s^2) ดังนั้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเร่งและความเร็วได้ดังนี้

$$m \frac{dv}{dt} = F_1 + F_2$$

เมื่อ F_1 คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของอนุภาค โดยที่ $F_1 = mg$ เมื่อ g เป็นความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งมีเฉพาะในแนวตั้ง คือ $g = -9.8$ เมตร/วินาที²

และ F_2 คือ แรงที่เกิดจากแรงเสียดทานของอากาศที่มีต่ออนุภาค สำหรับกรณีนี้ที่อากาศนิ่ง [25] คือ

$$F_2 = \pm kv^2 \quad (4.1)$$

โดยที่ k เป็น สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction)

$$\text{โดยที่ } k = \frac{1}{2} C_D \rho_{air} A \text{ และ } k > 0$$

เมื่อ C_D เป็น สัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient)

ρ_{air} เป็น ความหนาแน่นของอากาศที่มีอยู่ในทางเดินหายใจ

A เป็น พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค โดยอนุภาคมีพื้นที่หน้าตัดเป็นทรงกลม

เครื่องหมายของแรงเสียดทานข้างต้น ขึ้นอยู่กับทิศทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งจะตรงข้ามกันเสมอ หากกำหนดให้การเคลื่อนที่ขึ้นเป็นทิศบวก เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ขึ้น ($v > 0$) จะทำให้ $F_2 < 0$ ในทำนองเดียวกันหากอนุภาคเคลื่อนที่ลง ($v < 0$) จึงทำให้ $F_2 > 0$ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เครื่องหมายของแรงเสียดทานจะตรงข้ามกับเครื่องหมายของความเร็ว อนุภาคเสมอ และสมการ (4.1) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$F_2 = -k v |v| \quad (4.1)'$$

ถ้าย้อนกลับมาทบทวนการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาในทางเดินหายใจที่กำลังศึกษาอยู่ โดยเริ่มต้นด้วยการอธิบายตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากบริเวณที่ทำการศึกษาคือบริเวณทางเดินหายใจของมนุษย์ที่มีลักษณะเป็นสามมิติ ดังนั้นในการบอกตำแหน่งใดๆในโดเมน จะต้องบอกเป็นพิกัด ตามแนวนอน แนวตั้ง และแนวลึก ซึ่งจะประกอบกันเป็นเวกเตอร์ $\mathbf{x} = (x, y, z)$ ด้วยเหตุนี้ความเร็วและความเร่งที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งแรงต่างๆที่กระทำกับอนุภาค จะต้องเป็นเวกเตอร์เช่นเดียวกัน โดยจะเขียนแสดงสัญลักษณ์ของเวกเตอร์ด้วยตัวพิมพ์หนา และได้ใช้แนวคิดเดียวกับการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในหนึ่งมิติดังที่กล่าวมาแล้ว

กำหนดให้ $\mathbf{x}^P(t)$ แทนตำแหน่งของอนุภาค และ $\mathbf{v}(t)$ แทนความเร็วของอนุภาค ณ ขณะเวลาใดๆ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\mathbf{v}(t) = \frac{d\mathbf{x}^P(t)}{dt}$$

สำหรับอนุภาคหนึ่งๆ ที่มีมวล m เคลื่อนที่ผ่านทางเดินหายใจที่มีการไหลของอากาศอยู่ภายใน ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออนุภาคนี้มีสองส่วน คือ แรงที่เป็นน้ำหนักของอนุภาคซึ่งเกิดจากแรงโน้มถ่วง และแรงที่เกิดจากแรงเสียดทานของอากาศที่มีต่ออนุภาค จากกฎข้อที่สองของนิวตัน คือ

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

สำหรับค่า $\mathbf{F}$ ทางซ้ายมือ คือ แรงที่กระทำต่ออนุภาค ส่วนทางด้านขวา $\mathbf{a}$ คือ ความเร่งของอนุภาค โดยที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเร่งและความเร็ว คือ

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt}$$

ดังนั้น เมื่อกำหนดให้ความเร็วของอนุภาค ณ เวลา t ใดๆ เป็น $\mathbf{v}(t)$ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$m \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

เมื่อ $\mathbf{F}_1$ คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของอนุภาค โดย $\mathbf{F}_1 = m\mathbf{g}$
 และ $\mathbf{F}_2$ คือ แรงที่เกิดจากแรงเสียดทานของอากาศที่มีต่ออนุภาค คือ

$$\mathbf{F}_2 = -k\mathbf{v}\|\mathbf{v}\|$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{F}_2 = k(-\mathbf{v})\|\mathbf{v}\|$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{F}_2 = k(-\mathbf{v})\frac{\|\mathbf{v}\|^2}{\|\mathbf{v}\|}$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{F}_2 = k\|\mathbf{v}\|^2\frac{(-\mathbf{v})}{\|\mathbf{v}\|}$$

เนื่องจากอนุภาคยาถูกส่งให้เคลื่อนที่เข้าไปยังทางเดินหายใจซึ่งต่างกับการเคลื่อนที่
 ในอากาศนิ่งทั่วไป เพราะทางเดินหายใจมีลักษณะเป็นช่องแคบที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร
 และความดันอยู่ตลอดเวลา โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลมาจากการะบวนการทำงานของ
 ร่างกาย นั่นคือ การหายใจเข้า-ออก ดังนั้นอากาศในทางเดินหายใจจึงมีทิศทางการไหล เข้า-ออก
 เป็นช่วงคาบเวลา ตามการยืดและหดตัวของกล้ามเนื้อกระบังลม ซึ่งเปรียบเสมือนว่าการเคลื่อนที่
 ในทางเดินหายใจนี้ไม่ใช่การเคลื่อนที่ในอากาศนิ่งทั่วไป แต่เป็นการเคลื่อนที่ในสนามอากาศที่มี
 ความเร็ว $\mathbf{u}$ ซึ่งความเร็ว $\mathbf{u}$ ย่อมส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วย ดังนั้นความเร็ว
 ของอนุภาค จะเป็นความเร็วลัพธ์ที่เกิดกับอนุภาค ณ ขณะนั้น โดยมีขนาดและทิศทางเป็น
 $\|\mathbf{u}-\mathbf{v}\|^2$ และ $\frac{(\mathbf{u}-\mathbf{v})}{\|\mathbf{u}-\mathbf{v}\|}$ ตามลำดับ เพราะฉะนั้นสมการของแรงที่เกิดจากแรงเสียดทานของอากาศ
 ที่มีต่ออนุภาค $\mathbf{F}_2$ จึงเปลี่ยนเป็น

$$\mathbf{F}_2 = k\|\mathbf{u}-\mathbf{v}\|^2\frac{(\mathbf{u}-\mathbf{v})}{\|\mathbf{u}-\mathbf{v}\|}$$

ดังนั้นสามารถร่างสมการทางคณิตศาสตร์ ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาแต่
 ละอนุภาคในทางเดินหายใจ แต่ละช่วงเวลา ดังนี้

$$m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{g} + k\|\mathbf{u}-\mathbf{v}\|^2\frac{(\mathbf{u}-\mathbf{v})}{\|\mathbf{u}-\mathbf{v}\|}$$

$$\frac{d\mathbf{x}^p}{dt} = \mathbf{v}$$

เมื่อนำ m หารตลอดในสมการแรก จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความเร็ว
 และตำแหน่งของอนุภาคยาหนึ่งอนุภาค ในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g} + \frac{k}{m} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2 \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v})}{\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2} \quad (4.2)$$

$$\frac{d\mathbf{x}^p}{dt} = \mathbf{v} \quad (4.3)$$

และหากกำหนดให้อนุภาคเหล่านี้ ถูกฉีดพ่นด้วยความเร็วเริ่มต้น $\mathbf{v}_0$ เมตร/วินาที เคลื่อนที่เข้าไปในทางเดินหายใจที่มีสนามการไหลของอากาศ ซึ่งมีความเร็วเป็น $\mathbf{u}$ เมตร/วินาที ดังนั้น จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นปัญหาค่าเริ่มต้น ซึ่งใช้อธิบายความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคยานึ่งอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g} + \frac{k}{m} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2 \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v})}{\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2} \quad \mathbf{v}(0) = \mathbf{v}_0 \quad (4.4)$$

$$\frac{d\mathbf{x}^p}{dt} = \mathbf{v} \quad \mathbf{x}^p(0) = \mathbf{x}_0^p \quad (4.5)$$

เมื่อ	$\mathbf{v}$	คือ	ความเร็วของอนุภาค ณ เวลาใดๆ (m/s)
	$\mathbf{g}$	คือ	ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงโลก (m/s^2)
	k	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (ไม่มีหน่วย)
	$\mathbf{x}_0^p$	คือ	ตำแหน่งของอนุภาคยา ณ เวลาเริ่มต้น (m)
	$\mathbf{x}^p$	คือ	ตำแหน่งของอนุภาคยา ณ เวลาใดๆ (m)

อย่างไรก็ตามสำหรับการศึกษเกี่ยวกับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีมวลน้อยมาก อย่างอนุภาคนั้น ขนาดของอนุภาคที่นิยมใช้ คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง ในขั้นต่อไป จึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับรัศมี โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะถือว่า อนุภาคนั้นมีรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีรัศมี r ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดเป็น πr^2 และเมื่อกำหนดค่าความหนาแน่นของอนุภาคเป็น ρ_p อนุภาคนั้นจะมีมวล คือ $m = \rho_p \frac{4\pi r^3}{3}$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

$$\text{เป็น } k = \frac{1}{2} C_D \rho_{air} \pi r^2 \quad \text{ดังนั้นจะได้ค่า } \frac{k}{m} = \frac{\frac{1}{2} C_D \rho_{air} \pi r^2}{\rho_p \frac{4\pi r^3}{3}} = \frac{3\rho_{air} C_D}{8\rho_p r}$$

สมการการเคลื่อนที่สำหรับอนุภาคในทางเดินหายใจ

จากสมการ (4.4) และ สมการ (4.5) ทำให้ได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาหนึ่งอนุภาค ดังนี้

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g} + \frac{3\rho_{air}C_D}{8\rho_p r} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2 \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v})}{\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|}, \quad \mathbf{v}(0) = \mathbf{v}_0. \quad (4.6)$$

$$\frac{d\mathbf{x}^p}{dt} = \mathbf{v}, \quad \mathbf{x}^p(0) = \mathbf{x}_0^p \quad (4.7)$$

เมื่อ $\mathbf{v}_0$	คือ	ความเร็วของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้น (m/s)
$\mathbf{v}$	คือ	ความเร็วของอนุภาค ณ ขณะเวลาใดๆ (m/s)
$\mathbf{g}$	คือ	ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงโลก (m/s^2)
k	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (ไม่มีหน่วย)
C_D	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient)
ρ_{air}	คือ	ความหนาแน่นของอากาศในทางเดินหายใจ
ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคยา (kg/m^3)
$\mathbf{x}_0^p$	คือ	ตำแหน่งของอนุภาคยา ณ เวลาเริ่มต้น (m)
$\mathbf{x}^p$	คือ	ตำแหน่งของอนุภาคยา ณ ขณะเวลาใดๆ (m)
$\mathbf{u}$	คือ	ความเร็วของอากาศในทางเดินการหายใจ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาและตำแหน่ง (m/s)

สมการคณิตศาสตร์ (4.6)–(4.7) ถูกสร้างขึ้นมาเพื่ออธิบายความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคยาหนึ่งอนุภาค ซึ่งเมื่อหาค่าความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคยาในแต่ละเวลาตั้งแต่เริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งเกิดการยึดเกาะได้ เราก็สามารถนำข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์ เพื่อหาแนวการเคลื่อนที่และตำแหน่งการยึดเกาะได้ในที่สุด

แต่เนื่องจากการสร้างแบบจำลองดังกล่าว ได้คำนึงถึงอิทธิพลของรูปแบบทิศทางการไหลของอากาศที่มีอยู่ในทางเดินหายใจเป็นหลัก จึงส่งผลให้แบบจำลองนั้นมีค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $\mathbf{u}$ ซึ่งคือ ค่าความเร็วอากาศติดอยู่ด้วย เพราะฉะนั้น หากต้องการแก้ปัญหาแบบจำลอง ก็จำเป็นต้องหาค่าความเร็ว $\mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ ที่เวลาและตำแหน่งนั้นๆ ให้ได้ ซึ่งในบทที่ผ่านมาได้หาผล

เฉลยเชิงตัวเลขของความเร็วอากาศโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไว้แล้ว แต่ค่าความเร็วอากาศที่หาได้จากวิธีการเชิงตัวเลขนั้น สามารถหาค่าได้ที่บางจุดของโดเมนเท่านั้น ส่วนกรณีที่ต้องการทราบค่าความเร็ว $\mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ ในตำแหน่งและเวลาอื่นที่ไม่ตรงกับข้อมูลที่มีอยู่ จะต้องนำค่าความเร็วอากาศที่หาได้ตามจุดต่อต่างๆ ไปประมาณค่า เพื่อหาความเร็ว $\mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ ที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดของวิธีการ ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

การประมาณค่าความเร็วอากาศ $\mathbf{u}(t, \mathbf{x})$

กำหนดให้แบ่งจุดรอยต่อของเวลาเป็น t_i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ เพื่อใช้สำหรับการหาผลเฉลยที่เกี่ยวข้องกับความเร็วของอนุภาค $\mathbf{v}(t)$ ตลอดช่วงเวลาดังแต่เริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งเกิดการยึดเกาะ เนื่องจากในการคำนวณหาความเร็วอนุภาค $\mathbf{v}$ ในแต่ละขณะเวลา t_i จะต้องอาศัยความเร็วอากาศ $\mathbf{u}$ ในขณะเวลา t_i นั้นด้วย แต่ความเร็ว $\mathbf{u}$ เป็นค่าที่ขึ้นกับทั้งตำแหน่งและเวลา ดังนั้นจึงเป็นการหาของค่าความเร็วอากาศ $\mathbf{u}(t_i)$ ที่ตำแหน่งเป็น $\mathbf{x}^p(t_i)$

ความเร็วของอากาศที่หาได้จากบทที่ 3 นั้น เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยความเร็วตามแกนนอน และความเร็วตามแกนตั้ง นั่นคือ $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}) = (u_1(t, \mathbf{x}), u_2(t, \mathbf{x}))$ ซึ่งถูกเก็บแยกกันไว้เป็นสองแฟ้มข้อมูล (data file) คือ แฟ้มข้อมูลของ $u_1(t, \mathbf{x})$ และ $u_2(t, \mathbf{x})$ ดังที่ได้แสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 3.4 และ 3.5 โดยที่ผลเฉลยเชิงตัวเลขหรือค่าความเร็วอากาศ ถูกหาค่าไว้เฉพาะที่จุดต่อ (node) (x_m, y_n) ณ ขณะเวลา t_i เท่านั้น โดยสองหลักแรก เป็นค่าของจุดพิกัด x_m และ y_n ตามลำดับ ส่วนหลักที่เหลือเป็นค่าความเร็ว u_1 และ u_2 ในแต่ละขณะเวลา t_i โดยที่ $i = 0, 1, 2, \dots, n_{\max}$ อย่างไรก็ตาม การประมาณค่าความเร็ว $u_1(t, \mathbf{x})$ และ $u_2(t, \mathbf{x})$ จะแยกกันคำนวณตามการส่งออกข้อมูลที่ถูกแยกส่งมา

ขั้นแรกต้องตรวจสอบว่า ณ ขณะเวลา t_i นั้น อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ที่ ณ จุดใดในโดเมน นั่นคือหาค่า $\mathbf{x}^p(t_i)$ ออกมา เมื่อได้ $\mathbf{x}^p(t_i)$ แล้วจึงนำไปหาค่าความเร็ว $\mathbf{u}$ ที่ตำแหน่ง $\mathbf{x}^p(t_i)$ หรือ $\mathbf{u}(t_i, \mathbf{x}^p(t_i))$ โดยอาศัยข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลผลเฉลยเชิงตัวเลขของความเร็ว u_1 และ u_2 ที่มีอยู่ ซึ่งการคำนวณหา $\mathbf{u}(t_i, \mathbf{x}^p(t_i))$ สามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ตรวจสอบว่ามีข้อมูลความเร็ว ณ เวลา t_i ที่จุด (x_m, y_n) ในแฟ้มข้อมูลหรือไม่ ซึ่งคือ การตรวจสอบว่า $\mathbf{x}^p(t_i) = (x_m, y_n)$ ไດและที่แนวหลักใดในแฟ้มข้อมูลหรือไม่ถ้ามีก็สามารถนำค่าที่ได้มาใช้ได้เลย แต่หากพบว่าข้อมูลที่มีอยู่ไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่ต้องการเลยจึงจะทำการประมาณค่า

2. ทำการประมาณค่าโดยแยกเป็นขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.1 ทำการตรวจสอบว่าตำแหน่ง $\mathbf{x}^p(t_i)$ เป็นจุดที่อยู่ในเอลิเมนต์ใดของโดเมนที่ถูกแบ่งเป็นโครงตาข่ายย่อยสี่เหลี่ยม เนื่องจากแต่ละเอลิเมนต์ย่อยมีจุดที่มุมทั้งหมดสี่จุด ดังนั้นในการตรวจสอบว่าตำแหน่ง $\mathbf{x}^p(t_i)$ นั้นตกอยู่ในเอลิเมนต์ไหน จะต้องนำข้อมูลของสองหลักแรกชุดละสี่แถวติดกันมาทำการตรวจสอบ เมื่อทราบเอลิเมนต์ที่ตำแหน่ง $\mathbf{x}^p(t_i)$ ตกอยู่ จึงทำการตรวจสอบเวลา t_i ต่อไป

2.2 ทำการตรวจสอบว่าเวลา t_i มีค่าตรงกับเวลาที่ถูกแบ่งไว้ตามแนวหลักในเพิ่มข้อมูลหรือไม่ ถ้าไม่มีก็ให้หาว่าค่าเวลาดังกล่าวอยู่ระหว่างสองหลักใด โดยกำหนดให้เวลาก่อนหน้าเป็น t_l และเวลาหลังเป็น t_r

2.3 เมื่อได้ทราบว่าตำแหน่ง $\mathbf{x}^p(t_i)$ นั้นตกอยู่ที่เอลิเมนต์ใดและทราบว่าเวลา t_i อยู่ระหว่างสองหลักใดแล้ว จึงนำค่าความเร็วที่จุดสี่จุดของสองเวลามาทำการประมาณค่า เพื่อหาความเร็วที่เวลา t_i เมื่อได้ค่าความเร็ว $u(x_m, y_n)$ ณ เวลา t_i ทั้งสี่ค่า จึงนำค่าทั้งสี่ค่านั้นมาประมาณค่าเข้าด้วยกัน(interpolation) โดยการสร้างเป็นฟังก์ชันความเร็วอากาศ $u(\mathbf{x}) = u(x, y)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสองตัวแปรที่เป็นสมการของระนาบในสามมิติ นั่นคือ เป็นการประมาณค่าเข้าด้วยกันแบบเชิงเส้นของสองตัวแปร (linear interpolation of two variables) โดยการสร้างจะต้องอาศัยจุดพิคตบนระนาบนี้อย่างน้อยสามจุด ซึ่งได้จากการประมาณค่าในครั้งแรกนั่นเอง และเมื่อได้ฟังก์ชันความเร็วที่จุดใด ๆ สำหรับเอลิเมนต์นั้นแล้ว ในที่สุดเราจึงหาความเร็วอากาศ ณ เวลาและตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยการแทนค่าเวลาและตำแหน่งนั้นๆลงในฟังก์ชันความเร็ว $u(\mathbf{x}) = u(x, y)$

อย่างไรก็ตาม การประมาณค่าตามกระบวนการข้างต้นจะทำสองครั้งโดยการตรวจสอบข้อมูลจากเพิ่มข้อมูลสองชุด เพื่อหาทั้งความเร็วของอากาศตามแนวแกนตั้ง u_1 และแนวนอน u_2

วิธีการและขั้นตอนการหาผลเฉลยสำหรับสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา

ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (4.6)-(4.7) เพื่อนำมาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ และตำแหน่งการยึดเกาะของอนุภาคยาสำหรับการพ่นยาหนึ่งครั้ง สามารถอธิบายขั้นตอนวิธีการทำงาน ดังนี้

กำหนดให้ ในการพ่นยาหนึ่งครั้ง มีอนุภาคยาเป็นจำนวน N อนุภาค แต่ละอนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันอยู่ในช่วง 1-20 ไมโครเมตร ดังนั้นจะต้องเขียนโปรแกรมโดยใช้วิธีการสุ่ม (random) เพื่อกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้อยู่ในช่วง 1-20 ไมโครเมตร

โดยสำหรับแต่ละอนุภาค $i, i = 1, 2, 3, \dots, N$ เราจะหา

1. หาความเร็วของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่เวลาต่างๆ เก็บไว้ในตัวแปร V_i
2. หาตำแหน่งของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่เวลาต่างๆ เก็บไว้ในตัวแปร X_i

ซึ่งในแต่ละเวลา t_n โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots$ จะคำนวณหา $\mathbf{v}_n$ และ $\mathbf{x}_n$ จากสมการ (4.3)-(4.4) โดยใช้วิธีของออยเลอร์(Euler's method) คือ

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_{n-1} + \Delta t \cdot \frac{d\mathbf{v}_{n-1}}{dt}$$

$$\mathbf{x}_n^p = \mathbf{x}_{n-1}^p + \Delta t \cdot \frac{d\mathbf{x}_{n-1}^p}{dt}$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า การหาค่า $\mathbf{v}_n$ จะต้องใช้ค่า $\frac{d\mathbf{v}_{n-1}}{dt}$ และการหาค่า $\mathbf{x}_n^p$ จะต้องใช้ค่า $\frac{d\mathbf{x}_{n-1}^p}{dt}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ(4.6) และ(4.7) ตามลำดับ เมื่อหาค่า $\mathbf{v}_n$ และ $\mathbf{x}_n^p$ ได้แล้วจึงนำค่าทั้งสองไปเก็บเป็นข้อมูลไว้ (เก็บไว้ในตัวแปร V_i และ X_i ตามลำดับ) และใช้ค่า $\mathbf{x}_n^p$ ที่ได้ ไปหาค่า $\mathbf{u}_n$ ตามที่อธิบายในหัวข้อก่อนหน้า เตรียมไว้สำหรับการคำนวณรอบต่อไป ซึ่งสามารถเขียนเป็นขั้นตอนการทำงานได้ ดังนี้

ขั้นตอนการคำนวณ

สำหรับแต่ละอนุภาค $i = 1, 2, 3, \dots, N$

1. คำนวณหาความเร็ว V_i และตำแหน่ง X_i สำหรับแต่ละขณะเวลา t_n

เมื่อ $n = 0$ กำหนดค่าเริ่มต้น $\mathbf{v}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{x}_0^p, t_{\max}, n_{\max}$ และ $\Delta t = \frac{t_{\max}}{n_{\max}}$

สำหรับ $n = 1, 2, 3, \dots, n_{\max}$

$$1.1 \quad \frac{d\mathbf{v}_{n-1}}{dt} = \mathbf{g} + \frac{3\rho_{air}C_D}{8\rho_p r} \|\mathbf{u}_{n-1} - \mathbf{v}_{n-1}\|^2 \frac{(\mathbf{u}_{n-1} - \mathbf{v}_{n-1})}{\|\mathbf{u}_{n-1} - \mathbf{v}_{n-1}\|},$$

$$1.2 \quad \frac{d\mathbf{x}_{n-1}^p}{dt} = \mathbf{v}_{n-1}$$

$$1.3 \quad \mathbf{v}_n = \mathbf{v}_{n-1} + \Delta t \cdot \frac{d\mathbf{v}_{n-1}}{dt}$$

$$1.4 \quad \mathbf{x}_n^p = \mathbf{x}_{n-1}^p + \Delta t \cdot \frac{d\mathbf{x}_{n-1}^p}{dt}$$

$$1.5 \quad \text{คำนวณหา } \mathbf{u}_n(\mathbf{x}_n^p, t_n) \text{ จากโปรแกรมย่อย}$$

2. นำ X_i มาจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับอนุภาค i
3. เก็บตำแหน่งสุดท้าย ที่อนุภาค i ยึดเกาะบนผนังทางเดินหายใจ
4. เก็บเวลาที่อนุภาค i ใช้ตั้งแต่เริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งยึดเกาะบนผนังทางเดินหายใจ

เมื่อหาค่าความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคที่เวลาต่างๆได้แล้ว จึงนำค่าที่ได้เหล่านั้นไปจำลองวิถีการเคลื่อนที่ และหาตำแหน่งการยึดเกาะของอนุภาคยาในทางเดินหายใจจนครบทุกอนุภาค นอกจากนี้จะนำค่าตำแหน่งสุดท้าย และเวลาที่อนุภาคยาแต่ละอนุภาคใช้ในการยึดเกาะมาสร้างฮิสโตแกรม เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคยา โดยการหาค่าความหนาแน่นของการยึดเกาะของอนุภาคยาที่บริเวณต่างๆบนผนังทางเดินหายใจ

การจำลองวิถีเคลื่อนที่และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคยาในทางเดินหายใจ

หลังจากการแก้ปัญหาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาแล้ว จะได้ค่าความเร็วอากาศและตำแหน่งของอนุภาคยาที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะถูกเก็บไว้ในตัวแปร V_i และ X_i ทั้งนี้การจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยานั้น ทำได้โดยนำข้อมูลตำแหน่งของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่เวลาต่างๆตั้งแต่เวลาเริ่มต้นไปจนถึงเวลาสิ้นสุดมาพล็อต แล้วเชื่อมจุดต่อของตำแหน่งอนุภาคแต่ละเวลาเข้าด้วยกันจะได้เป็นวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาหนึ่งอนุภาค เมื่อทำจนครบทั้งหมด N อนุภาค จะได้วิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาสำหรับการพ่นยาแต่ละครั้ง และในส่วนของការวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคยานั้น จะศึกษาจากสัดส่วนการยึดเกาะของอนุภาคยากับผนังทางเดินหายใจ

ผลการวิจัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาในทางเดินหายใจ

เมื่อได้ผลเฉลยเชิงตัวเลขแล้ว เพื่อความเข้าใจในพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคยาที่ถูกส่งด้วยความเร็วเริ่มต้นค่าหนึ่ง เข้าไปในทางเดินหายใจที่มีอากาศไหลเวียนอยู่ภายใน ผลเฉลยเชิงตัวเลขดังกล่าว จะถูกนำมาจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ และวิเคราะห์ความหนาแน่นของการยึดเกาะของอนุภาคยาบนผนังทางเดินหายใจ และเพื่อความเข้าใจที่ชัดเจน ผลการวิจัยจะถูกนำเสนอเป็นสองรูปแบบ คือ ภาพจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาแต่ละอนุภาค ตั้งแต่เริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งเกาะติด (splat) กับผนังทางเดินหายใจ และแผนภูมิแสดงอัตราการกระจายตัวของการยึดเกาะของอนุภาคยาบนผนังทางเดินหายใจ รวมทั้งแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคกับเวลาด้วย ทั้งนี้ผลการวิจัยดังกล่าวจะถูกแสดงที่ค่าพารามิเตอร์ต่างกันทั้งค่าความเร็วเริ่มต้น ค่ามุมสูงสุดของการกระจายตัวของอนุภาคยาเมื่อถูกฉีดพ่น และค่าความหนาแน่นของอนุภาคยา

1. ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์

สำหรับแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาในทางเดินหายใจ มีค่าเริ่มต้นที่เกี่ยวข้องกับความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคยา ความเร็วอากาศ รวมถึงแรงและความเร่งต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง ซึ่งจะอยู่ในรูปเวกเตอร์และมีค่าดังต่อไปนี้

ความเร็วเริ่มต้นของอนุภาค คือ $\mathbf{v}_0 = V_0 [\cos \theta, \sin \theta]^T$ เมตร/วินาที โดยที่ $\theta \in [-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$

ตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค คือ $\left(0, L_5 + L_4 + \frac{L_3}{2}\right)$ เมตร

ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง คือ $\mathbf{g} = [0, -9.8]^T$ เมตร/วินาที²

ในการวิเคราะห์ผล และตรวจสอบความถูกต้องเหมาะสมของแบบจำลองที่นำเสนอ นั้น จะต้องทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ โดยทดสอบว่าพารามิเตอร์นั้นๆ จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของอนุภาคยาอย่างไรบ้าง โดยเราจะทำการวิเคราะห์กับพารามิเตอร์บางตัวเท่านั้น ได้แก่ ขนาดของความเร็วเริ่มต้น V_0 มุมสูงสุดของการกระจายตัวของอนุภาคยาเมื่อถูกฉีดพ่น $\theta_{\max}$ และความหนาแน่นของอนุภาคยา ρ_p รายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1

พารามิเตอร์สำหรับคุณสมบัติของอนุภาคยา

พารามิเตอร์ (Parameter)	ค่า (Value)
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาคยา ($d_p, \mu m$)	1-20
สัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient, C_D , dimensionless)	0.39

ตารางที่ 4.2

พารามิเตอร์สำหรับคุณสมบัติของอนุภาคยาที่ใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์ (Parameter)	ค่า (Value)
ความหนาแน่นของอนุภาค ρ (kg/m^3)	ระหว่าง 800-2000
ขนาดของความเร็วเริ่มต้นของการฉีดพ่นยา V_0 (m/s)	ระหว่าง 200-1000
มุมสูงสุดของการของการกระจายตัวของอนุภาคยา θ_{max} ($radian$)	ระหว่าง $\frac{\pi}{20} - \frac{\pi}{4}$

2. ผลเฉลยเชิงตัวเลขและการตีความเบื้องต้น

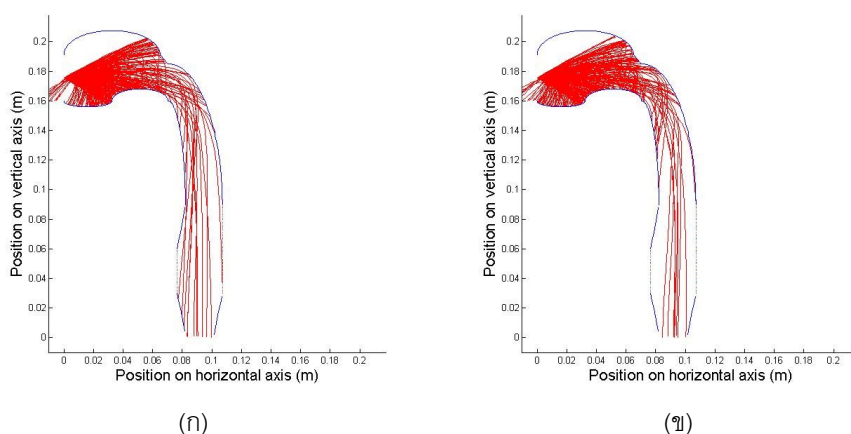
สำหรับการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขนั้น ทำได้โดยการเขียนโปรแกรมบน MATLAB 7.9 ตามขั้นตอนวิธีการหาผลเฉลยที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งระยะเวลาที่จะทำการวิเคราะห์ คือ $t_{max} = 4$ วินาที และกำหนดให้มีจำนวนอนุภาคที่เกิดจากการฉีดพ่นแต่ละครั้ง คือ $N = 300$ อนุภาค

ทั้งนี้จะสังเกตว่าแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาตามสมการที่ 4.6 และ 4.7 มีพจน์ของความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกติดอยู่ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งคือมีมวลน้อยมาก ทำให้ค่าความเร่งที่กล่าวถึงอาจไม่ส่งผลใดๆต่ออนุภาคยาเลยก็ได้ ดังนั้นในส่วนแรกนี้จะศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของอนุภาคยาที่เกิดขึ้น ระหว่างแบบจำลองที่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก และแบบจำลองที่ไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก ว่าให้ผลแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

โดยในส่วนนี้จะกำหนดให้อนุภาคยามีความหนาแน่นเป็น $\rho = 1550$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ถูกฉีดพ่นด้วยขนาดของความเร็วเริ่มต้น $V_0 = 800$ เมตร/วินาที ด้วยมุม $\theta_{\max} = \frac{\pi}{6}$ เรเดียน ซึ่งผลการวิจัยจะถูกแสดงโดยการจำลองแนวเส้นทางหรือวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา ดังรูปที่ 4.1 การกระจายตัวของการยึดเกาะของอนุภาคยาตามแกนนอนและแกนตั้ง ดังรูปที่ 4.2 และสุดท้าย คือ แสดงระยะเวลาที่แต่ละอนุภาคใช้ตั้งแต่เริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งยึดเกาะกับผนัง ดังรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.1

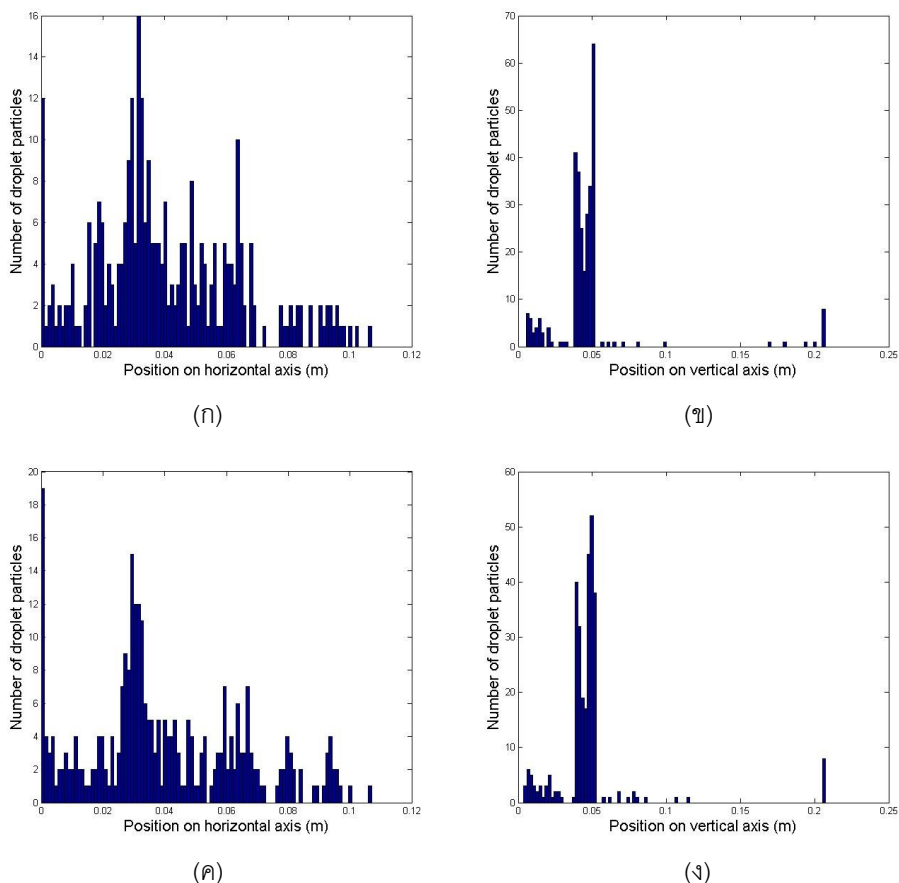
ภาพจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาที่ถูกพ่นด้วยความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน กรณีพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง (ก) และไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง (ข)



รูปที่ 4.1 แสดงวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาแต่ละอนุภาคตั้งแต่เริ่มเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งเริ่มต้นจนกระทั่งยึดเกาะบนผนังทางเดินหายใจ จากภาพจำลองการเคลื่อนที่ทั้งสองพบว่าอนุภาคยา มีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยอนุภาคยาจำนวนมากเริ่มยึดเกาะกับผนังทางเดินหายใจตั้งแต่บริเวณช่องปาก และมีบางส่วนเคลื่อนที่ต่อไปจนมายึดเกาะบริเวณลำคอและหลอดลมตอนต้น ส่วนอนุภาคยาที่ยังไม่ยึดเกาะบริเวณใด จะเคลื่อนที่ต่อไปตามลำคอแล้วบางส่วนได้เกิดการยึดเกาะที่บริเวณผนังของหลอดลมตอนกลางทางด้านซ้าย ซึ่งพบว่าในกรณีที่พิจารณาผลของแรงโน้มถ่วง (ก) จะมีการยึดเกาะที่บริเวณนี้มากกว่าเมื่อไม่พิจารณาผลของแรงโน้มถ่วง (ข) อย่างไรก็ตามยังมีอนุภาคยาส่วนหนึ่งที่ยังไม่ยึดเกาะบริเวณใดๆ และได้เคลื่อนที่ต่อไปตามท่อทางเดินหายใจจนถึงขั้วปอด จากผลข้างต้นพบว่าแบบจำลองทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก

รูปที่ 4.2

แผนภูมิแสดงอัตราการกระจายตัวของการยึดเกาะของอนุภาคยาตามแกนนอน(ซ้าย)แกนตั้ง(ขวา)
กรณีพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง(ก,ข)และไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง(ค,ง)



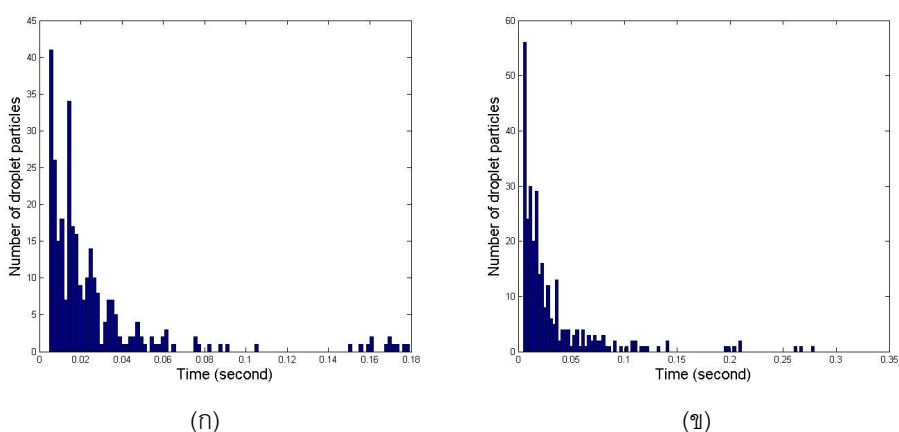
รูปที่ 4.2 เป็นแผนภูมิแสดงอัตราการกระจายตัวของการยึดเกาะของอนุภาคยาบนผนังทางเดินหายใจตามแกนนอน (รูปทางซ้าย) และตามแกนตั้ง (รูปทางขวา) จากแผนภูมิความหมายของแกนในแนวดิ่ง หมายถึง จำนวนอนุภาคยาที่ยึดเกาะบนผนังทางเดินหายใจในแต่ละตำแหน่ง สำหรับรูปซ้ายมือแกนนอน หมายถึง ระยะทางที่อนุภาคยาที่ยึดเกาะห่างจากตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อวัดตามแนวแกนนอน เช่นเดียวกับรูปทางขวามือซึ่งมีความหมายเหมือนกันเว้นแต่จะวัดตามแนวแกนตั้ง

จากแผนภูมิที่ 4.2 (ก) และ (ค) พบว่าอนุภาคยาเกิดการยึดเกาะตั้งแต่แนวระดับเดียวกับตำแหน่งเริ่มต้นนั่นคือที่ตำแหน่งศูนย์ โดยมีอนุภาคที่ยึดเกาะถึง 12-20 อนุภาคและมีอัตรา

การยืดเกาะหนาแน่นในช่วง 2-8 เซนติเมตร ส่วนแผนภูมิที่ 4.2 (ข) และ(ง) จะสังเกตว่าการยืดเกาะจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ตำแหน่งห่างจากจุดเริ่มต้นประมาณ 5 เซนติเมตร และเกิดการยืดเกาะส่วนใหญ่บริเวณใกล้กับจุดเริ่มต้น ทั้งนี้ การศึกษาการกระจายตัวของกรยึดเกาะตามแกนนอนและแกนตั้งนี้ สอดคล้องกันกับวิธีการเคลื่อนที่ตามรูปที่ 4.1 (ก,ข) นั่นเอง

รูปที่ 4.3

แผนภูมิแสดงอัตราการใช้เวลาในการยืดเกาะของอนุภาคยากรณี
พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง(ก)และไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง(ข)



รูปที่ 4.3 เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคกับเวลาที่แต่ละอนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งยืดเกาะกับผนังทางเดินหายใจ จากการสังเกตพบว่าการยืดเกาะของอนุภาคส่วนใหญ่เกิดขึ้นเร็วมากโดยเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นฉีดพ่นและเสร็จสิ้นภายในระยะเวลาไม่ถึงหนึ่งนาที่เท่านั้น

3. การวิเคราะห์พารามิเตอร์

ในหัวข้อนี้จะศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิจัยเพื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของอนุภาคยา ทั้งวิธีการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของตำแหน่งการยืดเกาะ โดยจะทำการศึกษากับพารามิเตอร์สามตัว ได้แก่ ขนาดความเร็วเริ่มต้น V_0 มุมสูงสุดของการกระจายตัวของอนุภาคยาเมื่อถูกฉีดพ่น $\theta_{\max}$ และความหนาแน่นของอนุภาคยา ρ_p

3.1 การเปรียบเทียบผลเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ขนาดความเร็วเริ่มต้น V_0

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทำได้โดย เปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากการฉีดพ่นยาที่มีความหนาแน่น 1550 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยค่ามุมสูงสุดของการกระจายตัว $\theta_{\max}$

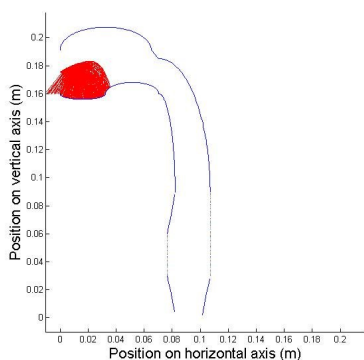
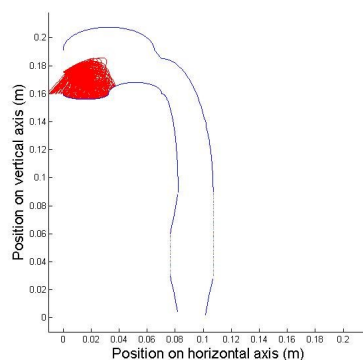
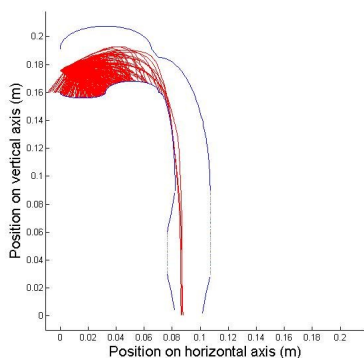
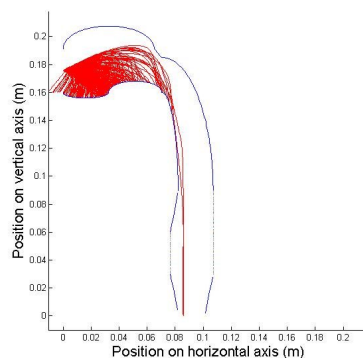
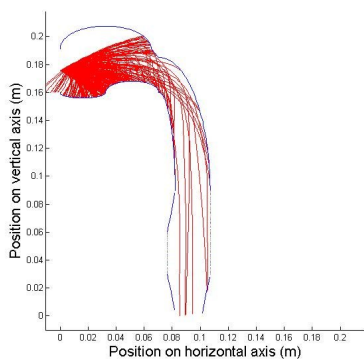
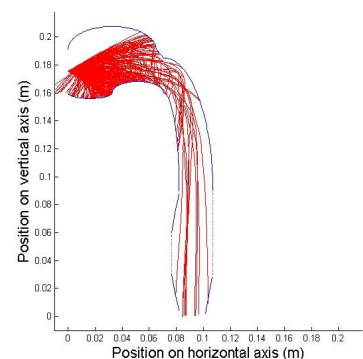
เป็น $\frac{\pi}{6}$ เรเดียน แต่ขนาดความเร็วเริ่มต้น V_0 ต่างกัน ได้แก่ 2 เมตร/วินาที 4 เมตร/วินาที และ 6 เมตร/วินาที ทั้งแบบจำลองที่พิจารณาผลที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง (รูปทางซ้าย) และไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง (รูปทางขวา) โดยลำดับแรกจะเปรียบเทียบผลการจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ต่อมาจะเปรียบเทียบอัตราการกระจายตัวของการยืดเกาะของอนุภาคยา บนผนังทางเดินหายใจตามแกนนอน และตามแกนตั้ง ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับท้ายที่สุดจะทำการเปรียบเทียบอัตราการใช้เวลาในการยืดเกาะบนผนังทางเดินหายใจของอนุภาคยา ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ทั้งนี้การศึกษาโดยใช้ชุดการทดลองดังกล่าว เพื่อต้องการที่จะเปรียบเทียบว่า เมื่อค่าความเร็วเริ่มต้นของการฉีดพ่นอนุภาคยาเปลี่ยนไป จะส่งผลให้พฤติกรรมของอนุภาคยา มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยหรือไม่ จากผลการจำลองดังแสดงใน รูปที่ 4.4-4.7 พบว่าเมื่อใช้ค่าความเร็วเริ่มต้น v_0 ต่างกัน ส่งผลให้แนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาต่างกันออกไปด้วย กล่าวคือที่ความเร็วเริ่มต้น v_0 น้อยๆ คือ กำหนดค่า $V_0 = 2$ เมตร/วินาที ดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ง) อนุภาคยา มีการเคลื่อนที่ไปได้ใกล้มาก และตกอยู่เฉพาะบริเวณตอนต้นของช่องปากเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มขนาดความเร็วเริ่มต้นเป็น $V_0 = 4$ เมตร/วินาที ดังรูปที่ 4.4 (ข) และ (จ) อนุภาคยา สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลขึ้น จนเกิดการยืดเกาะที่บริเวณลำคอด้านล่าง และมีบางส่วนที่เคลื่อนที่ต่อไปได้จนถึงบริเวณขั้วปอด ส่วนกรณีที่กำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นเป็น $V_0 = 6$ ดังรูปที่ 4.4 (ค) และ (ฉ) พบว่าอนุภาคยา มีการเคลื่อนที่ไปได้ไกลมาก มีการยืดเกาะบริเวณลำคอด้านบนและล่าง และยังยืดเกาะบนผนังทางเดินหายใจช่วงหลอดลมอีกด้วย นอกจากนี้อนุภาคบางส่วนที่ยังไม่ยืดเกาะกับบริเวณใดก็ยังเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงขั้วปอด โดยสังเกตได้จากวิถีเส้นตรงจากต้นหลอดลม จนถึงขั้วปอด ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่ามีจำนวนอนุภาคมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่กำหนดขนาดความเร็วเริ่มต้นเป็น $V_0 = 4$ เมตร/วินาที สำหรับระยะเวลาที่อนุภาคยาเคลื่อนที่ไปยืดเกาะกับผนังทางเดินหายใจนั้นมีความคล้ายคลึงกันทั้งสามแบบโดยจะเริ่มยืดเกาะตั้งแต่เริ่มฉีดพ่นและใช้เวลาเสร็จสิ้นเร็วมาก

นอกจากนี้ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.7 ซึ่งแสดงผลการจำลองทั้งกรณีพิจารณาผลที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง (รูปทางซ้าย) และไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง (รูปทางขวา) ซึ่งสังเกตพบว่าผลการจำลองของทั้งสองกรณีมีความคล้ายคลึงกันมาก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา ภายใต้อิทธิพลการไหลของอากาศในทางเดินหายใจ และอนุภาคยามีขนาดเล็กมาก จนทำให้ผลของแรงโน้มถ่วงไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่

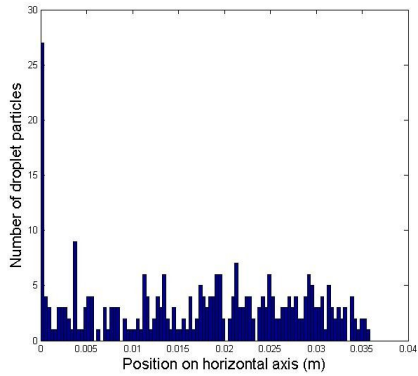
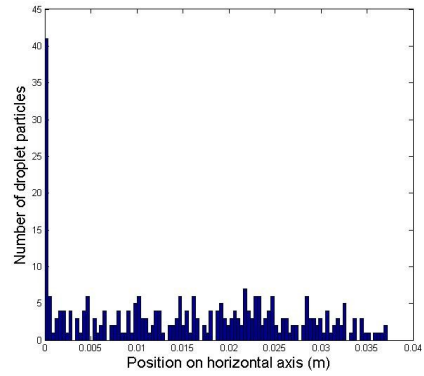
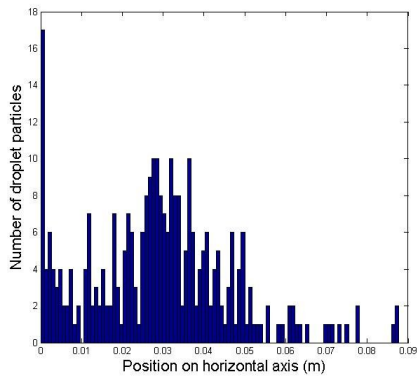
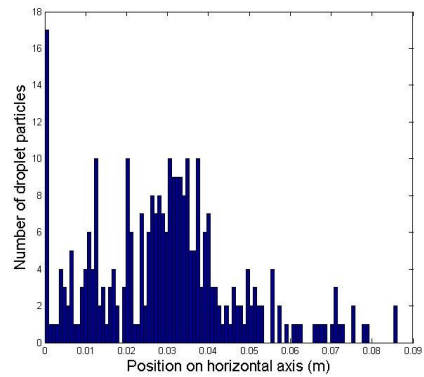
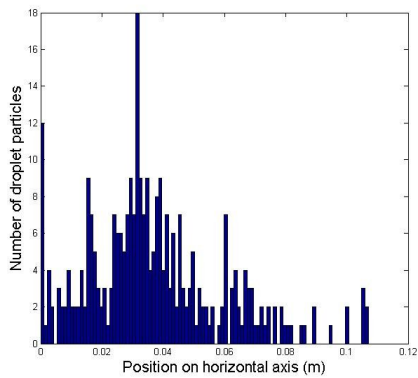
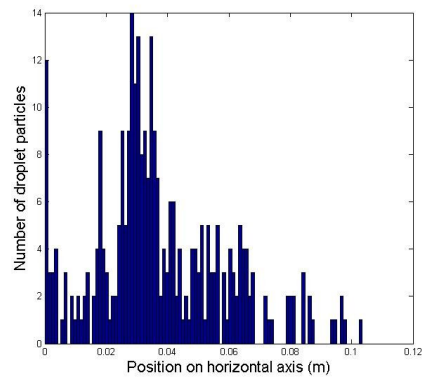
รูปที่ 4.4

ภาพจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา ที่ถูกพ่นด้วยค่ามุมสูงสุดของการกระจายตัวเท่ากัน
แต่มีขนาดความเร็วเริ่มต้นต่างกัน กรณีพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง(ซ้าย)
และไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง(ขวา)

(ก) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ง) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ข) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(จ) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(ค) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที(ฉ) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที

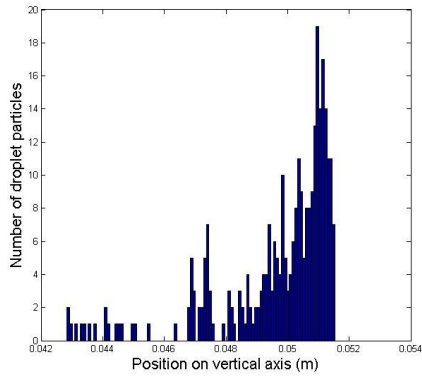
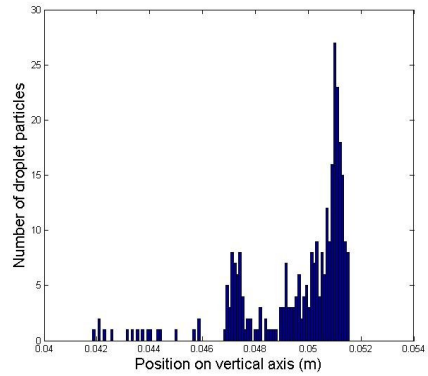
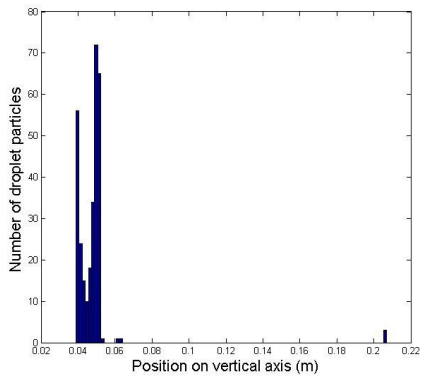
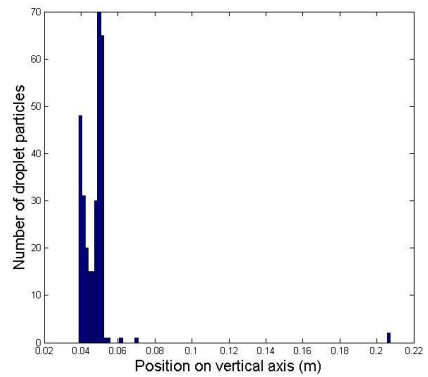
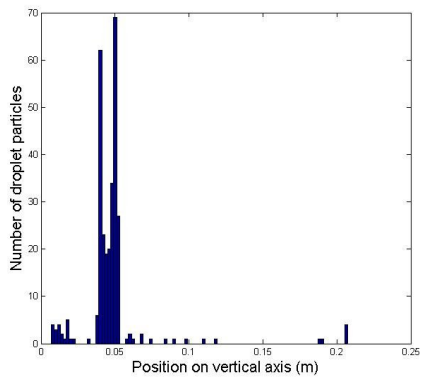
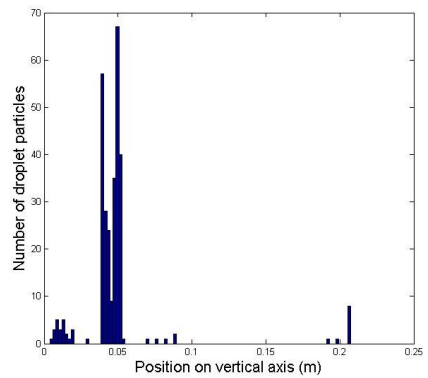
รูปที่ 4.5

แผนภูมิแสดงอัตราการกระจายตัวของการยืดเกาะของอนุภาคยาตามแกนอนซึ่งถูกพ่นด้วยขนาดความเร็วเริ่มต้นต่างกัน กรณีพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง(ซ้าย)และไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง(ขวา)

(ก) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ง) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ข) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(จ) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(ค) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที(ฉ) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที

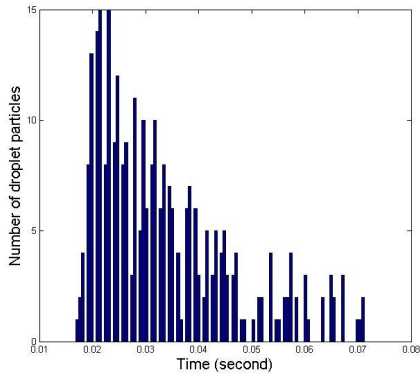
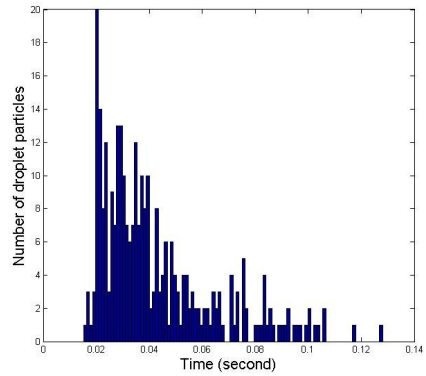
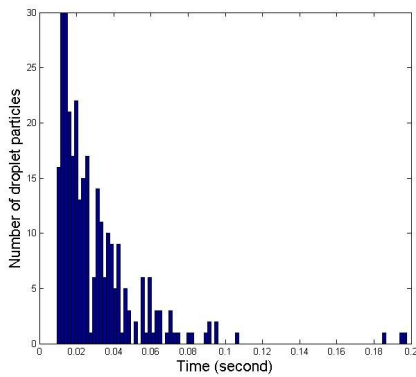
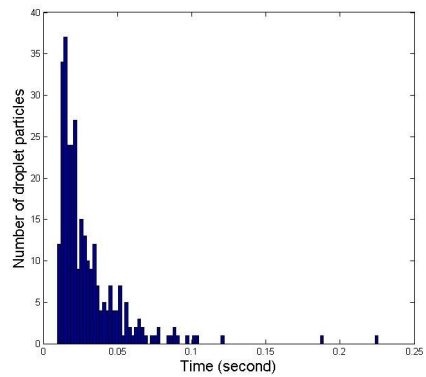
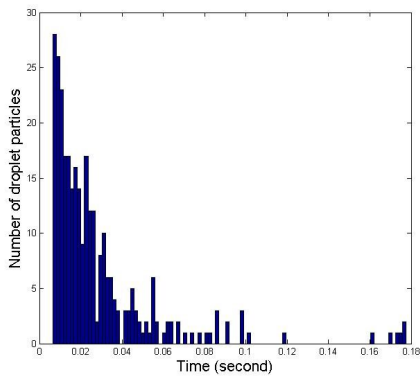
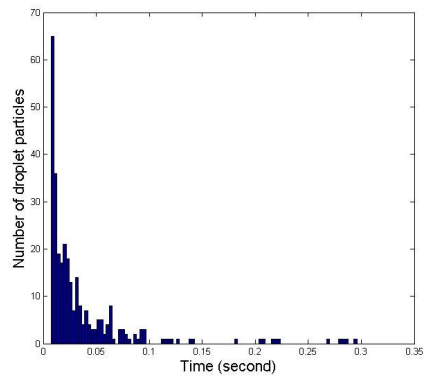
รูปที่ 4.6

แผนภูมิแสดงอัตราการกระจายตัวของการยึดเกาะของอนุภาคยาตามแกนตั้ง ซึ่งถูกพ่นด้วยขนาดความเร็วเริ่มต้นต่างกัน กรณีพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง(ซ้าย)และไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง(ขวา)

(ก) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ง) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ข) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(จ) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(ค) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที(ฉ) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที

รูปที่ 4.7

แผนภูมิแสดงอัตราการใช้เวลาในการยึดเกาะของอนุภาคยา ซึ่งถูกพ่นด้วยขนาดความเร็วเริ่มต้นต่างกัน กรณีพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง(ซ้าย) และไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง(ขวา)

(ก) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ง) $V_0 = 2$ เมตร/วินาที(ข) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(จ) $V_0 = 4$ เมตร/วินาที(ค) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที(ฉ) $V_0 = 6$ เมตร/วินาที

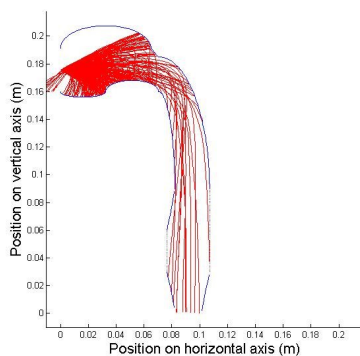
3.2 การเปรียบเทียบผลเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์มุมของการฉีด $\theta_{\max}$

การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตัวนี้ ทำได้โดยเปรียบเทียบผลการจำลอง ที่ได้จากการฉีดพ่นยาที่มีความหนาแน่น 1550 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน คือ $V_0 = 8$ เมตร/วินาที แต่มีมุมสูงสุดของการกระจายตัว $\theta_{\max}$ ต่างกันเป็น $\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{9}$ และ $\frac{\pi}{20}$ เรเดียน โดยลำดับแรกจะเปรียบเทียบผลการจำลองวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ต่อมาจะเปรียบเทียบอัตราการกระจายตัวของการยึดเกาะของอนุภาคยาบนผนังทางเดินหายใจ ตามแกนนอนและตามแกนดิ่งดังรูปที่ 4.9 และท้ายที่สุดจะทำการเปรียบเทียบ อัตราการใช้เวลาในการยึดเกาะบนผนังทางเดินหายใจของอนุภาคยา ดังแสดงดังรูปที่ 4.10

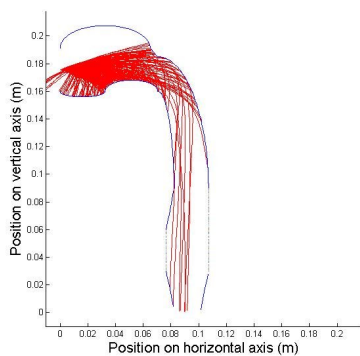
โดยการศึกษาจากชุดการทดสอบดังกล่าว เพื่อต้องการที่จะเปรียบเทียบว่าเมื่อมุมสูงสุดของการกระจายตัวของอนุภาคยาเปลี่ยนไป จะส่งผลให้พฤติกรรมของอนุภาคยามีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยหรือไม่ จากผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.10 พบว่ามุมของการฉีดพ่นยา มีผลอย่างยิ่งต่อวิธีการเคลื่อนที่ และตำแหน่งการยึดเกาะของอนุภาคยาเช่นเดียวกันกับความเร็วเริ่มต้นในการฉีดพ่นยา โดยที่มุม $\theta_{\max}$ ที่ต่างกันส่งผลให้แนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาต่างกันด้วย กล่าวคือ เมื่อมุม $\theta_{\max}$ มากหรือมุมของการฉีดพ่นยากว้างเกินไป เช่น $\theta_{\max} = \frac{\pi}{6}$ เรเดียน และ $\theta_{\max} = \frac{\pi}{9}$ เรเดียน จะเกิดการยึดเกาะของอนุภาคจำนวนมาก ตั้งแต่บริเวณช่องปาก ซึ่งทำให้อนุภาคที่เคลื่อนตัวลงมาเกาะติดที่ลำคอ และเคลื่อนที่ต่อไปยังขั้วปอดมีจำนวนน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองเมื่อใช้ค่ามุม $\theta_{\max} = \frac{\pi}{20}$ เรเดียน และอาจกล่าวได้ว่ามุมที่มีค่าน้อยๆ จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ไกลยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามค่ามุดังกล่าวจะต้องไม่น้อยเกินไปจนทำให้อนุภาคยาติดเกาะเฉพาะที่ผนังของลำคอเท่านั้น ส่วนระยะเวลาที่อนุภาคยาเคลื่อนที่ไปยึดเกาะกับผนังทางเดินหายใจนั้น มีความคล้ายคลึงกันทั้งสามแบบ โดยจะเริ่มยึดเกาะตั้งแต่เริ่มฉีดพ่นและเสร็จสิ้นในเวลาอันรวดเร็ว ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของยาที่ใช้ฉีดพ่น นั่นคือ ความหนาแน่นของอนุภาคยา ρ_p

รูปที่ 4.8

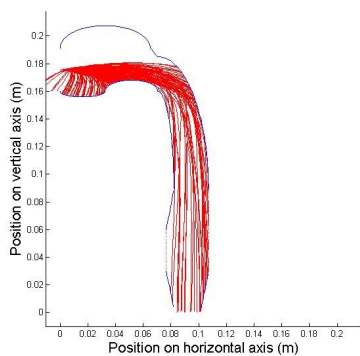
ภาพจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกพ่นด้วย ขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน แต่มีมุมสูงสุดของการกระจายตัวต่างกัน



$$(ก) \theta_{\max} = \frac{\pi}{6} \text{ เรเดียน}$$



$$(ข) \theta_{\max} = \frac{\pi}{9} \text{ เรเดียน}$$

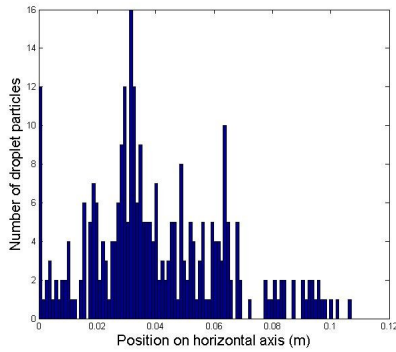


$$(ค) \theta_{\max} = \frac{\pi}{20} \text{ เรเดียน}$$

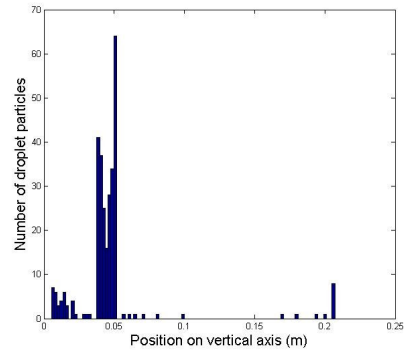
รูปที่ 4.9

แผนภูมิแสดงอัตราการกระจายตัวของการยืดเกาะของอนุภาคยาตามแกนนอน(ซ้าย)แกนตั้ง(ขวา)

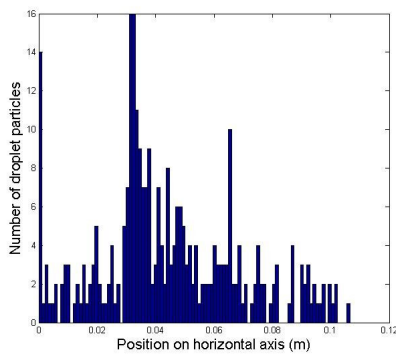
เมื่อถูกพ่นด้วยขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน แต่มีมุมสูงสุดของการกระจายตัวต่างกัน



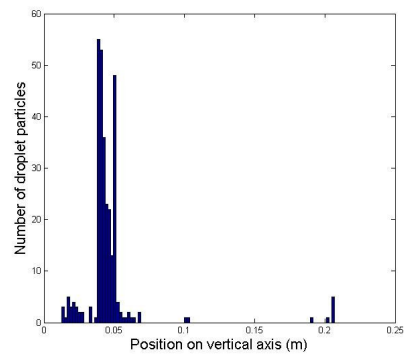
$$(ก) \theta_{\max} = \frac{\pi}{6} \text{ เรเดียน}$$



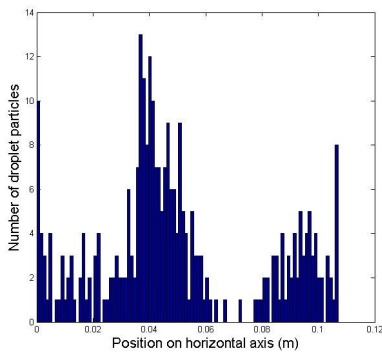
$$(ข) \theta_{\max} = \frac{\pi}{6} \text{ เรเดียน}$$



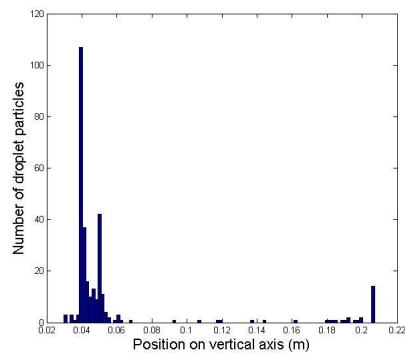
$$(ค) \theta_{\max} = \frac{\pi}{9} \text{ เรเดียน}$$



$$(ง) \theta_{\max} = \frac{\pi}{9} \text{ เรเดียน}$$



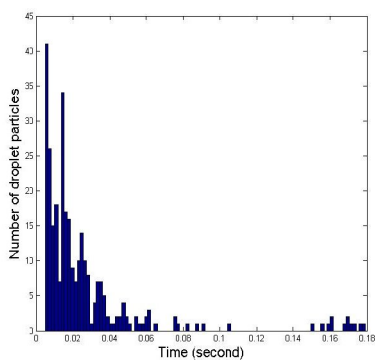
$$(จ) \theta_{\max} = \frac{\pi}{20} \text{ เรเดียน}$$



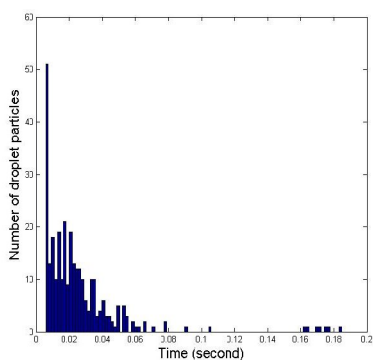
$$(ฉ) \theta_{\max} = \frac{\pi}{20} \text{ เรเดียน}$$

รูปที่ 4.10

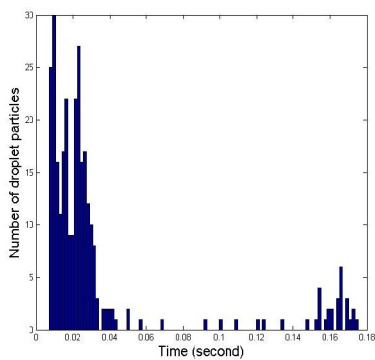
แผนภูมิแสดงอัตราการใช้เวลาในการยัดเกาะของอนุภาคยา เมื่อถูกพ่นด้วย
ขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน แต่มีมุมสูงสุดของการกระจายตัวต่างกัน



$$(ก) \theta_{\max} = \frac{\pi}{6} \text{ เรเดียน}$$



$$(ข) \theta_{\max} = \frac{\pi}{9} \text{ เรเดียน}$$



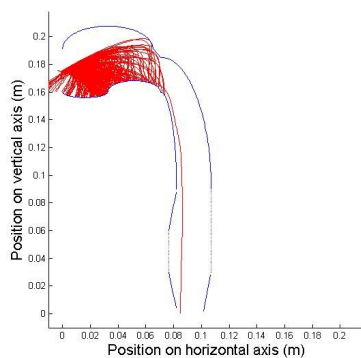
$$(ค) \theta_{\max} = \frac{\pi}{20} \text{ เรเดียน}$$

3. การเปรียบเทียบผลเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ความหนาแน่นของอนุภาค ยา ρ_p

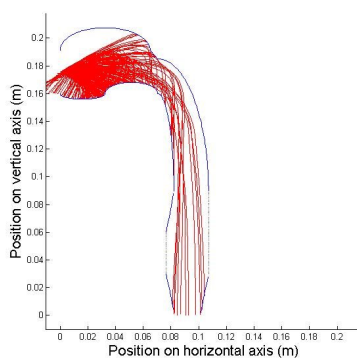
การวิเคราะห์พารามิเตอร์นี้ทำได้โดยเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากการฉีดพ่นยาที่ด้วยขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน คือ $V_0 = 8$ เมตร/วินาที และมีความสูงสูงสุดในการกระจายตัว $\theta_{\max}$ เท่ากัน คือ $\frac{\pi}{6}$ เรเดียน แต่ความหนาแน่นของอนุภาคยาต่างกันเป็น 997 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 1550 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ลำดับแรกจะทำการเปรียบเทียบผลการจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ต่อมาจะเปรียบเทียบอัตราการกระจายตัวของการยืดเกาะของอนุภาคยาบนผนังทางเดินหายใจตามแกนนอนและตามแกนตั้งดังรูปที่ 4.12 และท้ายที่สุดจะทำการเปรียบเทียบอัตราการใช้เวลาในการยืดเกาะบนผนังทางเดินหายใจของอนุภาคยา ดังแสดงดังรูปที่ 4.13 โดยการศึกษาจากชุดการทดสอบดังกล่าว เพื่อต้องการที่จะเปรียบเทียบว่าเมื่อค่าความสูงสูงสุดในการกระจายตัวของอนุภาคยาเปลี่ยนไป จะส่งผลให้พฤติกรรมของอนุภาคยามีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยหรือไม่ จากผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.13 พบว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคยา ρ_p ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอนุภาคยา จะส่งผลต่อวิถีการเคลื่อนที่และตำแหน่งการยืดเกาะของอนุภาคยา เช่นเดียวกับความเร็วเริ่มต้นและมุมของการฉีดพ่นยา กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของอนุภาคยาเป็น 997 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อนุภาคยาจะเคลื่อนที่ได้้น้อยมากจนทำให้มีอนุภาคยาคงอยู่บริเวณช่องปากและลำคอเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคยาเป็น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อนุภาคยาจะเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้น มีการยืดเกาะบนผนังทางเดินหายใจมากขึ้น และมีบางส่วนที่ไม่ยืดเกาะบริเวณใดๆแล้วเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงขั้วปอด ส่วนกรณีที่กำหนดให้ความหนาแน่นของอนุภาคยาเป็น 1550 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร การเคลื่อนที่ของอนุภาคยามีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองเมื่อกำหนดค่าความหนาแน่นของอนุภาคยาเป็น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร แต่จะแตกต่างกันตรงที่มีการยืดเกาะของอนุภาคยา บริเวณลำคอและหลอดลมตอนต้นมากกว่า ส่วนระยะเวลาที่อนุภาคยาเคลื่อนที่ไปยืดเกาะกับผนังทางเดินหายใจนั้น มีความคล้ายคลึงกันทั้งสามแบบ โดยจะเริ่มยืดเกาะตั้งแต่เริ่มฉีดพ่นและเสร็จสิ้นในเวลาอันรวดเร็ว เช่นเดียวกับการทดสอบที่ผ่านมา

รูปที่ 4.11

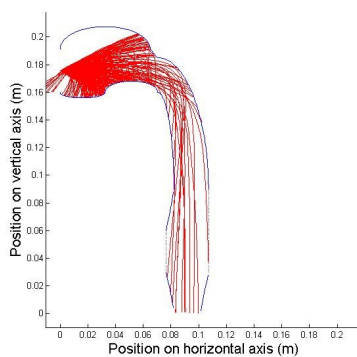
ภาพจำลองวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาที่ถูกพ่นด้วย ขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน แต่ความหนาแน่นของอนุภาคยาต่างกัน



(ก) $\rho_p = 997$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



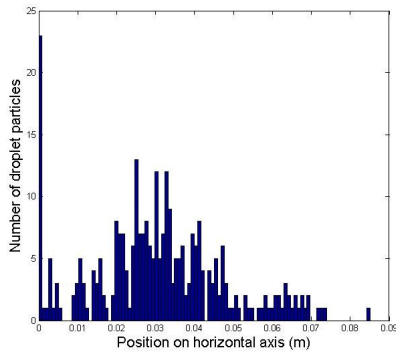
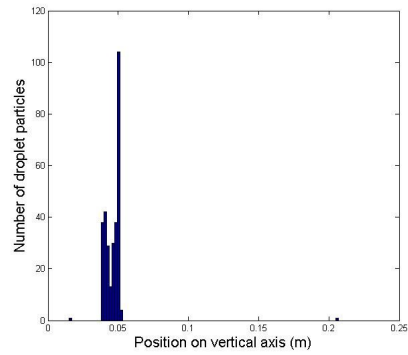
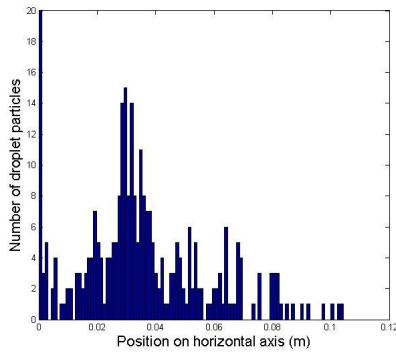
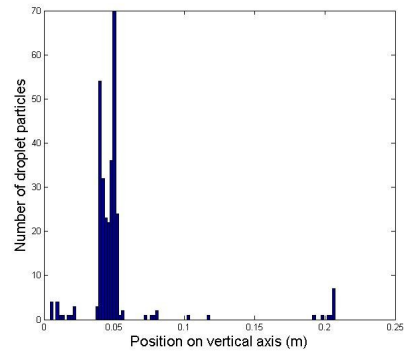
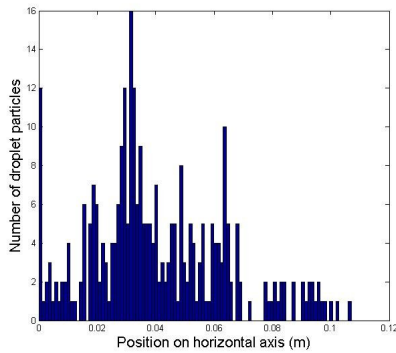
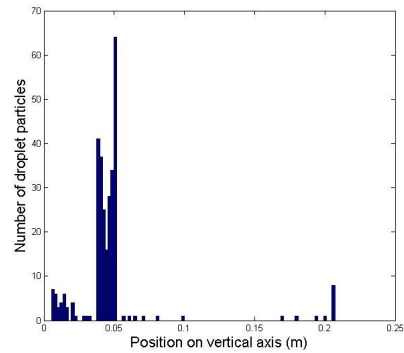
(ข) $\rho_p = 1200$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



(ค) $\rho_p = 1550$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

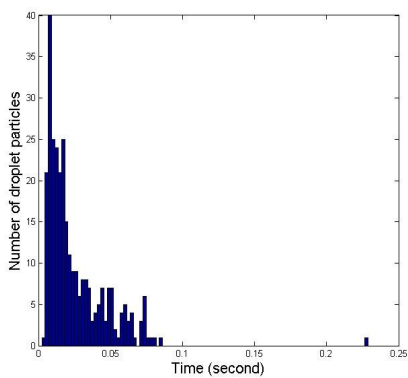
รูปที่ 4.12

แผนภูมิแสดงอัตราการกระจายตัวของการยืดเกาะของอนุภาคยาตามแกนนอน(ซ้าย)แกนตั้ง(ขวา)
เมื่อถูกพ่นด้วยขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน แต่ความหนาแน่นของอนุภาคยาต่างกัน

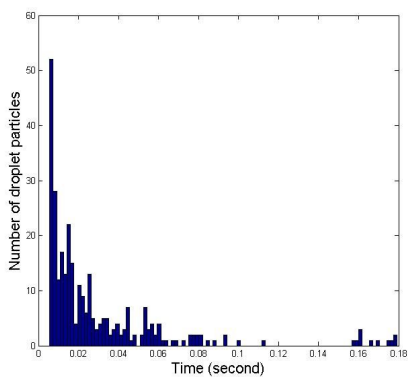
(ก) $\rho_p = 997$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร(ข) $\rho_p = 997$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร(ค) $\rho_p = 1200$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร(ง) $\rho_p = 1200$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร(จ) $\rho_p = 1550$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร(ฉ) $\rho_p = 1550$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 4.13

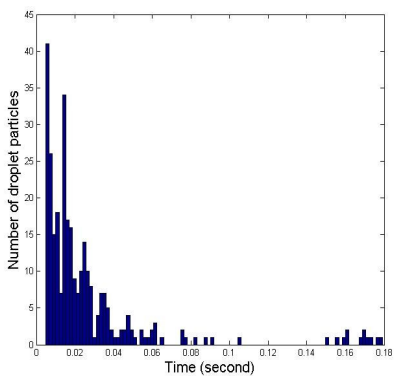
แผนภูมิแสดงอัตราการใช้เวลาในการยิดเกาะของอนุภาคยาเมื่อถูกพ่นด้วย
ขนาดความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน แต่ความหนาแน่นของอนุภาคยาต่างกัน



(ก) $\rho_p = 997$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



(ข) $\rho_p = 1200$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



(ค) $\rho_p = 1550$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากการศึกษาแบบจำลองที่ได้จากชุดทดสอบสามชุดทำให้ทราบว่า ทั้งมุมสูงสุดในการกระจายตัว และขนาดความเร็วเริ่มต้นของการฉีดพ่นยา รวมทั้งความหนาแน่นของอนุภาคยา ต่างก็ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของอนุภาคยา ทั้งวิถีการเคลื่อนที่ และตำแหน่งการยึดเกาะ ดังนั้นจะยึดค่าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเป็นหลักไม่ได้ และต้องทำการศึกษาควบคู่กันไป

อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ความหนาแน่นของอนุภาคยา ρ_p พบว่าอนุภาคยาสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้น เมื่อความหนาแน่นของอนุภาคยาเพิ่มขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลการจำลองดังกล่าว จากสมการความเร่งของอนุภาคยา คือ

$$\frac{dv}{dt} = \mathbf{g} + \frac{3\rho_{air}C_D}{8\rho_p r} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|^2 \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v})}{\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|}$$

จากการวิเคราะห์สมการข้างต้นโดยการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของอนุภาคยา พบว่า เมื่อ ρ_p **มีค่ามาก** จะทำให้ความเร่งที่เกิดจากแรงต้านหรือแรงที่เกิดจากแรงเสียดทานอากาศ (พจน์ที่สองทางขวามือของสมการ) มีค่าน้อยลง ซึ่งเมื่อแรงต้านมีค่าน้อยลง อนุภาคยาจึงเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้น ในทางกลับกัน หาก ρ_p **มีค่าน้อย** ก็จะส่งผลต่อความเร่งที่เกิดจากแรงต้าน และค่าของแรงต้านให้มีค่ามากขึ้น ดังนั้น เมื่อแรงต้านมีค่ามากขึ้น อนุภาคยาจะเคลื่อนที่ได้ น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ ρ_p มีค่ามากนั่นเอง

สรุปผลการวิจัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาในทางเดินหายใจ

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคยา โดยนำเสนอผลการวิจัยทั้งวิธีการเคลื่อนที่และวิเคราะห์การกระจายตัวของการยึดเกาะของอนุภาคยา นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ว่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ตัวใดส่งผลต่อแบบจำลองที่นำเสนอบ้าง โดยแบ่งพิจารณา ดังนี้

1. พิจารณาผลของแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กมาก และมีมวลน้อยมาก จากผลการวิจัยพบว่าอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่และการยึดเกาะของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ในทางเดินหายใจที่มีลักษณะเป็นสนามการไหลของอากาศ ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองนี้ให้ดียิ่งขึ้นไปอีกได้

2. พิจารณาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของอนุภาคยาหรือการวิเคราะห์พารามิเตอร์ ในที่นี้ได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์สามตัว คือ ความเร็วเริ่มต้น V_0 มุมสูงสุดของการกระจายตัวของอนุภาคยาเมื่อถูกฉีดพ่น $\theta_{\max}$ และความหนาแน่นของอนุภาคยา ρ_p ซึ่งพบว่าพารามิเตอร์ทั้งสามตัวส่งผลต่อวิธีการเคลื่อนที่และการยึดเกาะของอนุภาคยา โดยผลการจำลองที่ได้สอดคล้องกับผลของงานวิจัยชิ้นอื่นๆ ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนออีกทางหนึ่ง

2.1 สำหรับความเร็วเริ่มต้น V_0 ถ้าใช้ขนาดของความเร็วเริ่มต้น V_0 น้อยๆ เช่น 2 เมตร/วินาที จะทำให้อนุภาคยามีการเคลื่อนที่ไปได้้น้อยมาก และจะตกอยู่เฉพาะในตอนต้นของช่องปากเท่านั้น และเมื่อเพิ่มขนาดความเร็วเริ่มต้นให้สูงขึ้น อนุภาคยาสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดการยึดเกาะที่บริเวณลำคอและหลอดลมมากขึ้นตามสัดส่วนความเร็วที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง เมื่อเพิ่มขนาดความเร็วเริ่มต้น V_0 เป็น 6 เมตร/วินาที พบว่ามีอนุภาคยาจำนวนมากสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้จนถึงบริเวณขั้วปอด

2.2 สำหรับมุมสูงสุดของการกระจายตัวของอนุภาคยาเมื่อถูกฉีดพ่น $\theta_{\max}$ เมื่ออนุภาคยาถูกพ่นด้วยมุม $\theta_{\max}$ มากๆ หรือมีขนาดมุมของการฉีดพ่นยาที่กว้างเกินไป เช่น $\theta_{\max} = \frac{\pi}{6}$ เรเดียน และ $\theta_{\max} = \frac{\pi}{9}$ เรเดียน จะเกิดการยึดเกาะของอนุภาคจำนวนมากตั้งแต่บริเวณช่องปาก ซึ่งทำให้อนุภาคที่เคลื่อนตัวลงมาเกาะติดที่ลำคอและเคลื่อนที่ต่อลงไปยังขั้วปอด

มีจำนวนน้อยมาก และเมื่อใช้ค่ามุม $\theta_{\max} = \frac{\pi}{20}$ เรเดียน ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ไกลยิ่งขึ้นแต่ มีการยืดเกาะบริเวณช่องปากและหลอดลมน้อยลง อย่างไรก็ตามการกำหนดค่ามุดังกล่าว หากกำหนดมีค่าน้อยเกินไปจะทำให้อนุภาคยืดเกาะเฉพาะที่บริเวณผนังลำคอเท่านั้น หรือหากมากเกินไปจะทำให้อนุภาคยาถูกส่งต่อไปยังบริเวณขั้วปอดน้อยมาก ซึ่งการเลือกใช้หรือกำหนดค่ามุดังนี้ ขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะนำไปใช้ประโยชน์ เช่น สำหรับการรักษาโรคที่เกิดบริเวณช่องปาก และลำคอ อาจจะต้องกำหนดให้มุมของการกระจายตัวมีค่ามากกว่าระดับนี้ เป็นต้น

2.3 สำหรับความหนาแน่นของอนุภาคยา ρ_p ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอนุภาคยา ก็ส่งผลต่อวิถีการเคลื่อนที่และตำแหน่งการยืดเกาะของอนุภาคยาเช่นเดียวกันกับพารามิเตอร์ของความเร็วเริ่มต้นและมุมของการฉีดพ่นยา กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของอนุภาคยาเป็น 997 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อนุภาคยาจะเคลื่อนที่ไปได้เล็กน้อย โดยอนุภาคยาจะเคลื่อนที่มาตกอยู่บริเวณช่องปากและลำคอเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคยาเป็น 1200-1550 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อนุภาคยาเคลื่อนที่ไปได้ไกลขึ้น โดยมีการยืดเกาะบนผนังทางเดินหายใจมากขึ้น และมีบางส่วนที่ไม่ยืดเกาะบริเวณใดๆแล้วเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงขั้วปอด

3. เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้ สามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อวิถีการเคลื่อนที่ การกระจายตัวของการยืดเกาะ และตำแหน่งการยืดเกาะบนผนังทางเดินหายใจได้ ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ ไปประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพของการรักษาให้ดียิ่งขึ้นได้