

พลศาสตร์ของอนุภาคบนเครื่องแยกแบบเส้นสะเทือน



นายจิตต์เกษม โยรีคณะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

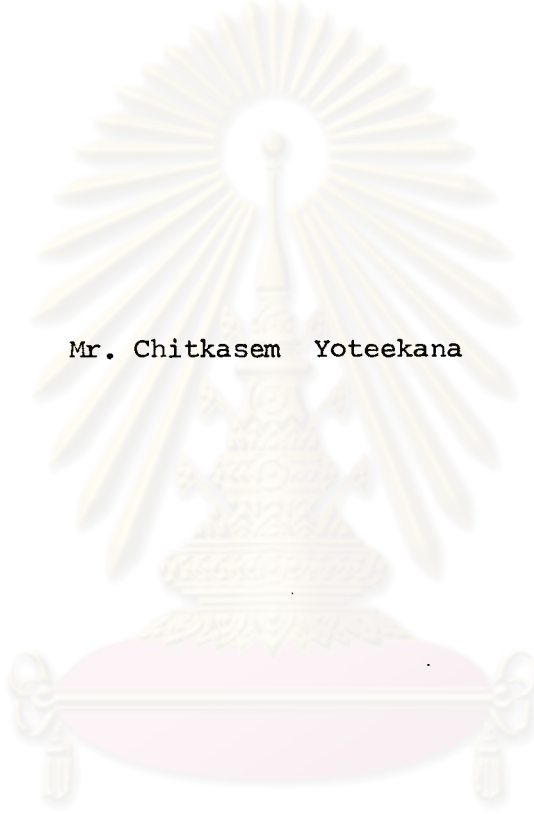
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

ISBN 974-566-851-6

013393

THE DYNAMICS OF PARTICLES ON A VIBRATORY SEPARATOR



Mr. Chitkasem Yoteekana

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1986

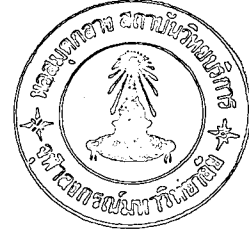
หัวข้อวิทยานิพนธ์ พลศาสตร์ของอนุภาคบนเครื่องแยกแบบสั่นสะเทือน

โดย นายจิตต์เกษม โยธินะ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ช่างชัย สิมปียากร

ดร. ชัยโรจน์ คุณชนธิ์กิจ



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร)

รักษาการในตำแหน่งรองคณบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนรักษาการในตำแหน่งคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ช่างชัย สิมปียากร)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณชนธิ์กิจ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์      พลค่า สัตร์ของ อนุภาคนบน เครื่องแยกแบบสั้นละ เทื่อน

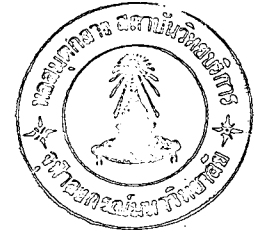
โดย                            นายสิตต์เกษม โยธิตะ

อาจารย์ที่ปรึกษา        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชำญชัย ลิมปียากร

                                     ดร. ชัยโรจน์ คุณพินิจกิจ

ภาควิชา                      วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา                2528



### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของอนุภาคในลำมามีดิบนภาตแยกซึ่งอยู่ภายใต้อิทธิพลของการสั้นละเทื่อน และการแกกกลุ่มลมการแบบทรานสิเอดลทลเพื่อหาค่าตบของการเคลื่อนตัวของอนุภาคโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ ในการวิเคราะห์ปัญหานั้นได้พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งสองกรณีคือกรณีแรกความเร่งในแนวตั้งฉากกับภาคมีค่าน้อยกว่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงซึ่งอนุภาคไม่มีพฤติกรรมการลอยตัวและกรณีหลังความเร่งในแนวตั้งฉากกับภาคมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงซึ่งอนุภาคมีพฤติกรรมการลอยตัวหนึ่งครั้งต่อวัฏจักร เพื่อให้การเสนอผลการศึกษาเป็นไปโดยง่าย ตัวแปรค่าในการออกแบบจะถูกลดให้อยู่ในเทอมของพารามิเตอร์ไร้มิติสี่ตัวคือ ตัวแรกอยู่ในเทอมของความเร่งในแนวตั้งฉากกับภาคและตัวอื่น ๆ อยู่ในเทอมของความเร่งในแนวขนานกับภาค ความลาดชันของภาคและความลาดเอียงของภาคตามลำดับ และนอกจากนี้ประสิทธิภาพในการเคลื่อนตัวได้ถูกกำหนดไว้ด้วยพารามิเตอร์ไร้มิติสองตัวเช่นกัน ดังนั้นแผนภูมิประสิทธิภาพของเครื่องแยกวัสดุแบบทั่วไปที่ลุ่มบูรณ์จึงประกอบด้วยพารามิเตอร์หกตัว

การศึกษานี้ได้เสนอผลลัพธ์ทั้งทางทฤษฎีและผลการทดลอง ตลอดจนอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อการเคลื่อนตัวของอนุภาค ซึ่งสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการเคลื่อนตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้นตามพารามิเตอร์ความเร่ง ประสิทธิภาพในการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าจะลดลงเมื่อพารามิเตอร์ความลาดชันมีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่พารามิเตอร์ความเสียดทานค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการเคลื่อนตัวด้านข้างจะเพิ่มขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ความลาดเอียงมีค่าสูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามพารามิเตอร์ความเสียดทาน จากการศึกษาเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีที่ได้จากการประมาณค่าในหนึ่งวัฏจักร กับผลการทดลอง ที่พารามิเตอร์ความเร่งต่ำเป็นที่พอใจ เมื่อพารามิเตอร์ความเร่งมีค่าสูงขึ้น

ผลลัพธ์มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากความแรงจริงที่ผิวของถาดแยกมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้เพราะผลของการสั่นสะเทือน

เพื่อแสดงให้เห็นถึงการนำผลการศึกษานี้ไปใช้ประโยชน์ซึ่งได้วาง เกณฑ์พื้นฐานในการออกแบบเครื่องแยกวัสดุแบบทั่วไปไว้ ในการหมุนเวคเตอร์การเคลื่อนตัวของวัสดุจะกระทำได้โดยการเพิ่มหรือลดค่าพารามิเตอร์ความแรง เพื่อที่จะทำให้การแยกตัวของวัสดุเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพควรจะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ความเสียดทานของวัสดุที่ต้องการแยกอยู่ระหว่างจุดตัดของเส้นกราฟพารามิเตอร์ความลาดชันที่ให้ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนตัว  $X$  เป็นศูนย์จึงจะทำให้วิธีในการเคลื่อนตัวของวัสดุที่ต้องการแยกมีความแตกต่างกันมากที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title            The Dynamics of Particles on a Vibratory Separator  
Name                     Mr. Chitkasem Yoteekana  
Thesis Advisor         Assistant Professor Chanchai Limpiyakorn  
                               Chairote Kunpanitchakit, Ph.D.  
Department             Mechanical Engineering  
Academic year         1985



#### ABSTRACT

A mathematical analysis of the motions of particles in three dimensions on vibratory separating trough, and the method used to solve a set of transcendental equations by means of a computer are presented. The analyses consider two forms of motions. First, the normal acceleration of the trough is less than the acceleration due to the gravity such that the particles have only sliding motions. Second, the normal acceleration of the trough is greater than the acceleration due to the gravity such that the particles hop away from the trough surface for a certain period during one vibration cycle. To simplify the presentation of the results, the design variables are reduced to four non-dimensional parameters, one for the normal acceleration and the others for the parallel acceleration, the front inclination of the trough and the side inclination of the trough, respectively. In addition, the transport performance are described by two non-dimensional displacement parameters. Hence, the completely general performance maps presented for a conventional vibratory separator contain six parameters.

Both theoretical and experimental results are presented and general conclusions of the effects of various parameters on the transport parameters are drawn. The transport performance improves as the acceleration parameter increases. The performance of the forward motion decreases as the front inclination parameter increases and there is a maximum forward motion corresponds to one friction parameter. The performance of the sideward motion increases as the side inclination parameter increases and it linearly increases as the friction parameter increases. The agreements between the predictions obtained from one cycle calculation and the experimental results at low acceleration parameters are found to be satisfactory. But the results differ substantially at higher acceleration parameters. This would indicate that the true acceleration of the separating surface is greater than the measured value due to the self-induced vibration.

To make use of the results, general design criteria of the conventional vibratory separator are concluded. The rotation of the transport vector can be done by increasing or decreasing the acceleration parameter. To improve the performance of the separation, the friction parameters of materials to be separated should be designed between the point of intersection on the graph of the front inclination parameter corresponds to the zero X-transport parameter, such that the materials to be separated will be moved on the most different path.



### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ช่างชัย สิมปียากกร และ อาจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกุล ในความกรุณาแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน และขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้อันเป็นพื้นฐานแก่ผู้วิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้สละเวลาให้กับวิทยานิพนธ์นี้ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณต่อ อาจารย์ ปรีชา ปิ่นทอง หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีขั้นสูง วัสดุที่กรุณาอนุญาตให้ใช้วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดจนคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือและให้กำลังใจ และขอขอบใจต่อนักศึกษาทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์นี้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายธีรสันต์ สว่างวรชาติ และ นายพงศ์ศักดิ์ หิรัญรัตน์ ที่ได้ช่วยงานผู้วิจัยตลอดมาโดยไม่เห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยยากจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ และสุดท้ายนี้ขอขอบใจสมาชิกของครอบครัวทุกคนที่ยอมรับและให้เวลาสำหรับการศึกษานี้

จิตต์เกษม โปธิคณะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





สารบัญ

ณ  
หน้า

|   |    |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                               | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                            | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ .....                               | ช  |
| สารบัญตารางประกอบ .....                             | ฉ  |
| สารบัญภาพประกอบ .....                               | ค  |
| รายการสัญลักษณ์ .....                               | ด  |
| บทที่   |    |
| 1    บทนำ .....                                     | 1  |
| ความเป็นมาของปัญหา .....                            | 1  |
| ภูมิหลังของทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....          | 2  |
| วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย .....              | 5  |
| ความสำคัญหรือประโยชน์ของการวิจัย .....              | 6  |
| 2    การพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ .....               | 7  |
| พื้นฐานทางกลศาสตร์ .....                            | 7  |
| การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                 | 23 |
| 3    การวิเคราะห์และแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ .....     | 57 |
| ตัวแปรค่าทางฟิสิกส์ .....                           | 57 |
| สัมมุติฐาน .....                                    | 58 |
| โมเดลทางคณิตศาสตร์ .....                            | 59 |
| กฎเกณฑ์และเงื่อนไขในการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ ..... | 61 |
| สมการทางคณิตศาสตร์และการแก้ปัญหา .....              | 63 |

สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ (ต่อ)  |      |
| 4 การแก้ปัญหาโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ .....                       | 81   |
| คำนำ .....   | 81   |
| การแก้สมการแบบทรานซีเดนทัล .....                             | 82   |
| โปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการคำนวณ .....                        | 83   |
| 5 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....                                 | 102  |
| อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....                                | 102  |
| การวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ .....                     | 104  |
| เครื่องมือวัดมุมเอียงของระนาบ .....                          | 105  |
| เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน .....                            | 105  |
| การวัดตัวแปรของระบบขับเคลื่อน .....                          | 113  |
| การวัดการเคลื่อนตัวของวัสดุ .....                            | 113  |
| 6 สรุปผลการศึกษา .....                                       | 115  |
| ผลทางทฤษฎี .....   | 115  |
| ผลการทดลอง .....   | 119  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ .....                                      | 124  |
| เกณฑ์ในการออกแบบ .....                                       | 130  |
| เอกสารอ้างอิง .....  | 138  |
| ภาคผนวก .....  | 140  |
| ภาคผนวก ก. โปรแกรมภาษาเบสิกที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนตัวของอนุภาค |      |
| แบบที่ไม่มีพฤติกรรมการลอยตัว .....                           | 141  |
| ภาคผนวก ข. โปรแกรมภาษาเบสิกที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนตัวของอนุภาค |      |
| แบบที่มีพฤติกรรมการลอยตัวหนึ่งครั้งต่อวัฏจักร .....          | 149  |
| ประวัติผู้เขียน .....  | 165  |

## สารบัญตารางประกอบ

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 1.1      | คุณลัมปิติทางพิสิทธ์ของเมลิคข์ว .....  | 2    |
| 2.1      | ค่าคงที่ K ของบูร กับ แมคคัลเสียน .....  | 30   |
| 2.2      | ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลำเสียงแบบสั้นสะเทือนทั่วไป .....   | 36   |
| 2.3      | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลำเสียงแบบสั้นสะเทือน<br>ระหว่างระบบร่วมเฟสกับระบบต่างเฟส ..... | 54   |
| 5.1      | ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ .....  | 107  |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพประกอบ

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 อุปกรณ์แยกเมล็ดข้าวแบบเขย่า .....  | 3    |
| 1.2 ลักษณะการกระจายและการแยกตัวของข้าวกล้องและข้าวเปลือกบนถาดแยก<br>ขณะทำงานในสภาวะปกติ .....                                | 3    |
| 2.1 ระบบพิกัดและมุมอ้างอิง .....   | 8    |
| 2.2 ผังวัตถุอิสระของอนุภาค .....   | 8    |
| 2.3 แรงแม่เหล็กจากการสั่นสะเทือนของรางที่กระทำต่ออนุภาค .....  | 11   |
| 2.4 เวกเตอร์จำกัดการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ .....   | 11   |
| 2.5 ผังแสดงถึงการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ ในกรณีที่อนุภาคไม่ลอยตัว .....   | 13   |
| 2.6 ผังแสดงถึงการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ ในกรณีที่อนุภาคลอยตัว .....  | 13   |
| 2.7 จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการลอยตัวซึ่งเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ความเร็ว .....  | 21   |
| 2.8 การเปรียบเทียบระหว่างแรงที่ต้องการและแรงที่มีขณะไถลตัวถอยหลัง<br>ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอาณาเขตในการไถลตัวถอยหลังมีจริง ..... | 21   |
| 2.9 ขอบเขตแสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ .....  | 25   |
| 2.10 การเปรียบเทียบระหว่างผลทางทฤษฎีและผลการทดลองของเบอร์รี่ .....   | 25   |
| 2.11 สัมพันธ์ภาพระหว่างความเร็วเฉลี่ยในการลำเลียงสูงสุดของอนุภาค<br>กับความเร็วในแนวขนานกับราง .....                         | 27   |
| 2.12 ผลการทำนายของบัวร์ กับ แมคคัลเลียน .....  | 27   |
| 2.13 ผลการทำนายของบัวร์ กับ แมคคัลเลียน .....  | 29   |
| 2.14 ผลการทำนายของบัวร์ กับ แมคคัลเลียน .....  | 29   |
| 2.15 การเปรียบเทียบระหว่างผลทางทฤษฎีและผลการทดลองของบัวร์กับแมคคัลเลียน  | 31   |

## สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.16 ผลทางทฤษฎีที่ได้ถูกปรับให้เป็นกราฟเส้นตรง .....  | 31   |
| 2.17 รูปร่างทั่ว ๆ ไปของอุปกรณ์ของ คิริข่าติ รัทานาญจิต .....   | 33   |
| 2.18 ตัวอย่างผลการศึกษาของ คิริข่าติ รัทานาญจิต .....   | 35   |
| 2.19 แผนภูมิประสิทธิภาพของ อุปกรณ์ลำเสียง แบบสั้นละเทือนซึ่งมีความเร็ว<br>ในการ เคลื่อนตัวรูปสามเหลี่ยม .....                                     | 38   |
| 2.20 แผนภูมิประสิทธิภาพของ อุปกรณ์ลำเสียง แบบสั้นละเทือนซึ่ง เคลื่อนตัวแบบ<br>ไซนูซอยด์ .....   | 38   |
| 2.21 กราฟแสดง การ เปลี่ยนแปลง ความเร็วในการ ลำเสียง เนื่องจาก ผลของ ความเร่ง<br>ในแนวตั้งฉากและมุมในการสั้นละเทือน .....                          | 40   |
| 2.22 การ เปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลองของ เรตฟอร์ดกับบรูธรอยด์   | 40   |
| 2.23 กราฟแสดง การ เปลี่ยนแปลง ความเร็วในการ ลำเสียง เนื่องจาก ผลของ ความ<br>ลาดชัน .....  | 41   |
| 2.24 ผลทางทฤษฎีซึ่ง แสดงให้เห็นถึง การ เปลี่ยนแปลง ความเร็วในการลำเสียง<br>เนื่องจาก ผลของ ความเสียดทานและมุมในการสั้นละเทือน .....               | 41   |
| 2.25 ผลทางทฤษฎีซึ่ง แสดงให้เห็นถึง การ เปลี่ยนแปลงมุมสั้นละเทือนที่พอเหมาะ<br>เนื่องจาก การ เปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและมุมลาดชัน ..... | 43   |
| 2.26 ผัง ความเร็ว และการ เคลื่อนตัวซึ่ง แสดงถึง คำตอบแบบ "FHFB" .....   | 43   |
| 2.27 ผัง ความเร็ว และการ เคลื่อนตัวซึ่ง แสดงถึง คำตอบแบบ "HFB" .....  | 44   |
| 2.28 ผัง ความเร็ว และการ เคลื่อนตัวซึ่ง แสดงถึง คำตอบแบบ "HB" .....   | 44   |
| 2.29 ผัง ความเร็ว และการ เคลื่อนตัวซึ่ง แสดงถึง คำตอบแบบ "SFHFB" .....  | 45   |
| 2.30 การ เปลี่ยนแปลง การ เคลื่อนตัวของ อนุภาคเนื่องจาก ผลของ การ กระชก ....   | 45   |

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 2.31   | 46   |
| 2.32   | 46   |
| 2.33   | 48   |
| 2.34   | 49   |
| 2.35   | 51   |
| 2.36   | 51   |
| 2.37   | 52   |
| 2.38   | 52   |
| 2.39   | 53   |
| 2.40   | 53   |
| 3.1    | 60   |
| 4.1    | 83   |
| 4.2    | 84   |
| 4.3    | 86   |
| 4.4    | 87   |

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 4.5    | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 0.6 ..... 88  |
| 4.6    | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 0.8 ..... 89  |
| 4.7    | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 1.0 ..... 90  |
| 4.8    | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 1.2 ..... 91  |
| 4.9    | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 1.4 ..... 92  |
| 4.10   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 1.6 ..... 93  |
| 4.11   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 1.8 ..... 94  |
| 4.12   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 2.0 ..... 95  |
| 4.13   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 2.2 ..... 96  |
| 4.14   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 2.4 ..... 97  |
| 4.15   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 2.6 ..... 98  |
| 4.16   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 2.8 ..... 99  |
| 4.17   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 3.0 ..... 100 |
| 4.18   | สัมพันธภาพระหว่าง X,Z กับ P1 P2 P3 เมื่อ A = 3.2 ..... 101 |
| 5.1    | ลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 103           |
| 5.2    | เครื่องมือวัดความเสียดทานจลน์ ..... 106                    |
| 5.3    | เครื่องมือวัดที่ใช้ในการปรับมุมของลาดแยก ..... 106         |
| 5.4    | ผังการวัดเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน ..... 108             |
| 5.5    | ลักษณะทั่วไปของมอเตอร์วัดความเร่ง ..... 110                |
| 5.6    | การชดเชยความไว ..... 110                                   |

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 5.7    | ผังวงจรของมิเตอร์วัดความเร่ง ..... 111   |
| 5.8    | ลักษณะทั่วไปของเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่ ..... 112  |
| 6.1    | การเปรียบเทียบทฤษฎีที่เล่นกับผลลัพธ์ของริงคูลอ ..... 118                                       |
| 6.2    | การเปรียบเทียบทฤษฎีที่เล่นกับผลลัพธ์ของเกเบอส์แบบ "FHFB" ..... 120                             |
| 6.3    | การเปรียบเทียบทฤษฎีที่เล่นกับผลลัพธ์ของเกเบอส์แบบ "HFB" ..... 121                              |
| 6.4    | การเปรียบเทียบทฤษฎีที่เล่นกับผลลัพธ์ของเกเบอส์แบบ "HB" ..... 122                               |
| 6.5    | การเปรียบเทียบทฤษฎีเล่นกับผลลัพธ์ของเกเบอส์แบบ "SFHFB" ..... 123                               |
| 6.6    | ผลทางทฤษฎีและผลการทดลองซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของ A และ P3 ที่มีต่อ X<br>เมื่อ $P1 = 0$ ..... 125   |
| 6.7    | ผลทางทฤษฎีและผลการทดลองซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของ A และ P3 ที่มีต่อ X<br>เมื่อ $P1 = 0.2$ ..... 126 |
| 6.8    | ผลทางทฤษฎีและผลการทดลองซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของ A และ P3 ที่มีต่อ X<br>เมื่อ $P1 = 0.4$ ..... 127 |
| 6.9    | ผลทางทฤษฎีและผลการทดลองซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของ A และ P3 ที่มีต่อ Z<br>เมื่อ $P2 = 0.4$ ..... 128 |
| 6.10   | ผลทางทฤษฎีและผลการทดลองซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของ A และ P3 ที่มีต่อ Z<br>เมื่อ $P2 = 0.8$ ..... 129 |
| 6.11   | วิธีการเคลื่อนตัวและแยกตัวระหว่างข้าวและข้าวเปลือกทางทฤษฎี<br>เมื่อ $A = 0.4$ ..... 136        |
| 6.12   | วิธีการเคลื่อนตัวและแยกตัวระหว่างข้าวและข้าวเปลือกทางทฤษฎี<br>เมื่อ $A = 0.6$ ..... 137        |





## รายการสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์       | ความหมาย   | ตัวแปรในโปรแกรม<br>ภาษา เบสิก |
|-----------------|--|-------------------------------|
| A               | พารามิเตอร์ความเร่ง  | A                             |
| Alim            | ค่าจำกัดสูงสุดของ A  | -                             |
| An              | ความเร่งในแนวตั้งฉากกับระนาบ                               | -                             |
| Ap              | ความเร่งในแนวขนานกับระนาบ                                  | -                             |
| a               | แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน                                 | -                             |
| an              | แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน<br>ในแนวตั้งฉากกับระนาบ         | -                             |
| ap              | แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน<br>ในแนวขนานกับระนาบ            | -                             |
| B               | อักษรห้อยท้ายสำหรับการไหลตัวถอยหลัง                        | B, EI (3)                     |
| b               | อักษรห้อยท้ายแสดงถึงจุดเริ่มต้น<br>การเคลื่อนตัวของอนุภาค  | B                             |
| e               | อักษรห้อยท้ายแสดงถึงจุดสิ้นสุด<br>การเคลื่อนตัวของอนุภาค   | -                             |
| F               | อักษรห้อยท้ายสำหรับการไหลตัวไป<br>ข้างหน้า                 | F, EI (2)                     |
| Fa              | แรงเสียดทานที่กีดกันได้                                    | -                             |
| Fa <sub>B</sub> | แรงเสียดทานที่กีดกันได้ในกรณีที่<br>อนุภาคไหลตัวถอยหลัง    | -                             |
| Fa <sub>F</sub> | แรงเสียดทานที่กีดกันได้ในกรณีที่<br>อนุภาคไหลตัวไปข้างหน้า | -                             |
| Fr              | แรงที่ต้องการให้เกิดการเกาะติด                             | -                             |
| Fx              | แรงเสียดทานในแนวแกน x                                      | -                             |
| Fz              | แรงเสียดทานในแนวแกน z                                      | -                             |

| สัญลักษณ์ | ความหมาย  | ตัวแปรในโปรแกรม<br>ภาษาเบสิก |
|-----------|---|------------------------------|
| f         | ความถี่ของการสั่นสะเทือน  | -                            |
| fr        | อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ความ<br>เสียดทานระหว่างการไหลตัวไปข้างหน้า<br>และการไหลตัวถอยหลัง | -                            |
| g         | ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  |                              |
| H         | อักษรห้อยท้ายสำหรับการลอยตัว  | H, EI (1), EJ (1)            |
| imp       | อักษรห้อยท้ายขณะเกิดการกระทบ  | IMP                          |
| L         | อักษรห้อยท้ายสำหรับการไหลตัว<br>ตามแกน z  | L, EJ (5)                    |
| L         | ความยาวของราง ที่ใช้กำหนด<br>ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานฉนวน                              | -                            |
| m         | มวลของอนุภาค  | -                            |
| N         | แรงปฏิกิริยาตั้งฉาก   | -                            |
| P1        | พารามิเตอร์ความลาดชัน   | P1                           |
| P2        | พารามิเตอร์ความลาดเอียง   | P2                           |
| P3        | พารามิเตอร์ความเสียดทาน   | P3                           |
| R1 R2 R3  | กรอบอ้างอิง   | -                            |
| S         | อักษรห้อยท้ายสำหรับการเกาะติด   | S, EI (4), EJ (6)            |
| t         | เวลา  | T1, T2                       |
| t         | อักษรห้อยท้ายสำหรับจุดสิ้นสุด<br>การไหลตัวภายหลังการกระทบ                                 | T                            |
| tr        | อัตราส่วนของความเร่งของราง ระหว่าง<br>ช่วงหวั่นเคลื่อนตัวไปข้างหน้าและถอยหลัง             |                              |
| U         | ความเร็วของอนุภาคในแนวแกน<br>x แบบไร้มิติ   | U                            |
| Ut        | ความเร็วของถาดแยกในแนวแกน<br>x แบบไร้มิติ   | UT                           |

| สัญลักษณ์          | ความหมาย   | ตัวแปรในโปรแกรม<br>ภาษา เบสิก |
|--------------------|--|-------------------------------|
| W                  | ความเร็วของอนุภาคในแนวแกน<br>z แบบไร้มิติ            | W                             |
| Wt                 | ความเร็วของกาดแยกในแนวแกน<br>z แบบไร้มิติ            | WT                            |
| X                  | พารามิเตอร์การเคลื่อนตัวใน<br>แนวแกน x แบบไร้มิติ    | X                             |
| $\dot{X}$          | พารามิเตอร์ความเร็วใน<br>แนวแกน x แบบไร้มิติ         | -                             |
| xm                 | ระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคเคลื่อนตัว<br>ไปในแนวแกน x     | -                             |
| $\dot{x}m$         | ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนตัว<br>ของอนุภาคในแนวแกน x | -                             |
| Z                  | พารามิเตอร์การเคลื่อนตัวใน<br>แนวแกน z แบบไร้มิติ    | Z                             |
| $\dot{Z}$          | พารามิเตอร์ความเร็วใน<br>แนวแกน z แบบไร้มิติ         | -                             |
| zm                 | ระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคเคลื่อนตัว<br>ไปในแนวแกน z     | -                             |
| $\dot{z}m$         | ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนตัว<br>ของอนุภาคในแนวแกน z | -                             |
| Vm                 | ความเร็วเฉลี่ยรวมในการ<br>เคลื่อนตัวของอนุภาค        | -                             |
| x, y, z            | พิกัดอ้างอิงการเคลื่อนตัวของอนุภาค                   | -                             |
| xt, yt, zt         | พิกัดอ้างอิงการเคลื่อนตัวของกาดแยก                   | -                             |
| $\alpha, \alpha_1$ | มุมลาดชันของระนาบ                                    | -                             |
| $\alpha_2$         | มุมลาดเอียงของระนาบ                                  | -                             |

| สัญลักษณ์         | ความหมาย   | ตัวแปรในโปรแกรม<br>ภาษา เบสิก |
|-------------------|--|-------------------------------|
| $\beta$           | มุมที่ใช้กำหนดทิศทางของการ<br>สั้นละ 1 ท่อน                      | -                             |
| $\epsilon$        | สัมประสิทธิ์ของการกระทบ  | -                             |
| $\omega$          | ความถี่เชิงมุม rad/sec   | -                             |
| $\tau = \omega t$ | ตำแหน่งเชิงมุม rad   | -                             |
| $\mu$             | สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน   | -                             |
| $\mu d$           | สัมประสิทธิ์ความเสียดทานฉนวน                                     | -                             |
| $\mu s$           | สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์                                   | -                             |
| $\xi$             | พารามิเตอร์ความลาดชัน<br>ของ เกเบอส์ (6)                         | -                             |
| $\phi$            | พารามิเตอร์ความเสียดทาน<br>ของ เกเบอส์ (6)                       | -                             |
| $\phi$            | มุมเฟส   | -                             |
| $\phi_{opt}$      | มุมเฟสที่เหมาะสม   | -                             |
| $\theta$          | มุมเอียงร่องรางที่ใช้กำหนด<br>สัมประสิทธิ์ความเสียดทานฉนวน       | -                             |
| $\tau_1$          | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาค<br>เริ่มต้นลอยตัว                        | HB                            |
| $\tau_2$          | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาค<br>สิ้นสุดการลอยตัว                      | HE                            |
| $\sin \tau_1$     | ค่า Sin ที่ใช้กำหนดตำแหน่ง<br>ที่อนุภาค เริ่มต้นลอยตัว           | ZH                            |
| $\sin \tau_{Fb}$  | ค่า Sin ที่ใช้กำหนดตำแหน่ง<br>ที่อนุภาค เริ่มต้นไกลตัวไปข้างหน้า | ZF                            |
| $\sin \tau_{Bb}$  | ค่า Sin ที่ใช้กำหนดตำแหน่ง<br>ที่อนุภาค เริ่มต้นไกลตัวถอยหลัง    | ZB                            |

| สัญลักษณ์                       | ความหมาย  | ตัวแปรในโปรแกรม<br>ภาษา เบสิก |
|---------------------------------|---|-------------------------------|
| $\text{Sin } \tau \text{Lb}$    | ค่า Sin ที่ใช้กำหนดตำแหน่ง<br>ที่อนุภาค เริ่มต้นไหลตัวลงตามแกน z              | ZL                            |
| $\omega_{\text{Fb}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาค เริ่มต้น<br>ไหลตัวไปข้างหน้า                          | FB                            |
| $\omega_{\text{Fe}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาคสิ้นสุดการไหล<br>ตัวไปข้างหน้า                         | FE                            |
| $\omega_{\text{Ft}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาคสิ้นสุด<br>การไหลตัวไปข้างหน้าภายหลังจาก<br>การตกกระทบ | FT                            |
| $\omega_{\text{Bb}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาค เริ่มต้น<br>ไหลตัวถอยหลัง                             | BB                            |
| $\omega_{\text{Be}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาคสิ้นสุด<br>การไหลตัวถอยหลัง                            | BE                            |
| $\omega_{\text{Bt}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาคสิ้นสุด<br>การไหลตัวถอยหลังภายหลังจากการตกกระทบ        | BT                            |
| $\omega_{\text{Lb}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาค เริ่มต้นไหลตัว<br>ลงตามแกน z                          | LB                            |
| $\omega_{\text{Le}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาคสิ้นสุดการไหลตัว<br>ลงตามแกน z                         | LE                            |
| $\omega_{\text{Lt}}^{\text{t}}$ | ตำแหน่งเชิงมุมที่อนุภาคสิ้นสุดการไหลตัว<br>ลงตามแกน z ภายหลังจากการตกกระทบ    | LT                            |