



## การจำลองพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยในสนามไฟฟ้ากระแสลับ

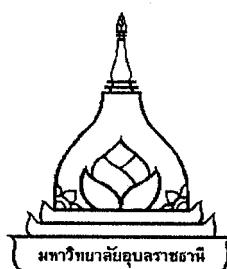
จันทร์เพ็ง อังฉกรรจ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2549

ISBN 974-523-125-8

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**COMPUTER SIMULATION OF BEHAVIOR OF COLLOIDAL  
PARTICLES IN ALTERNATING ELETRIC FIELD**

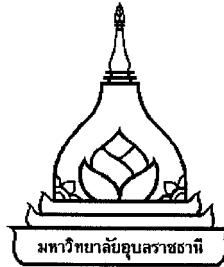
**CHANPENG ANGCHAKAN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
MAJOR IN PHYSICS FACULTY OF SCIENCE  
UBON RAJATHANE UNIVERSITY**

**YEAR 2006**

**ISBN 974-523-125-8**

**COPYRIGHT OF UBON RAJATANEE UNIVERSITY**

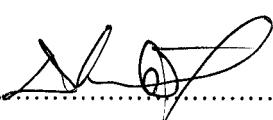


ในรับรองวิทยานิพนธ์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เรื่อง การดำเนินการของอนุภาคเชวนลอยในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ

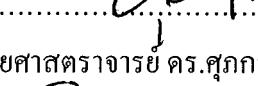
ผู้จัด นายจันทร์เพ็ง อังจกรรจ\*

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

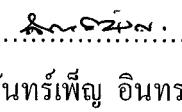
 อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทน์ทรอ นุตโกร)

 กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กิโย ปันยารชุน)

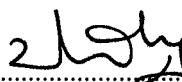
 กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุดม ทิพราษ)

 กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกร ภูเกิด)

 กรรมการ  
(ดร. ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นก)

 คณบดี  
(ดร. จันทร์เพ็ง อินทรประเสริฐ)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

  
(ศาสตราจารย์ ดร. ประกอบ วิโรจน์ภูว)  
อธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปีการศึกษา พ.ศ. 2549

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ เอ้าใจใส่ ด้วยดีจากคณาจารย์ในภาควิชาพิสิกส์หลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พศ.ดร.ชานินทร์ นุตโตร อาจารย์ที่ปรึกษาได้ให้คำแนะนำปรึกษาอย่างใกล้ชิดในทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็น ด้านแนวคิด ทฤษฎี การใช้คอมพิวเตอร์ การเขียนโปรแกรมคำนวณทางชีวภาพ พิมพ์เอกสาร กระบวนการทำงาน รวมถึงตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอบพระคุณ พศ.ดร.อุดม ทิพราษ และ พศ.ดร.ศุภกร ภู่เกิด ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิชาการที่เป็นพื้นฐาน และคุณเอ้าใจใส่การศึกษา ดร.อนุชา แสงไธสง และ ดร.ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นook ที่ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์และการโปรแกรม ขอบคุณคุณเชิดชัย วุฒิยา ที่ช่วยจัดเตรียมและอำนวยความสะดวก ด้านคอมพิวเตอร์และระบบเน็ตเวอร์ก คุณสุภาพร กรณ์แก้ว ที่ช่วยดูต่อประสานงานและอำนวยความสะดวกด้านธุรการ

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ และคุณครูในอดีตทุกท่าน ที่ได้ให้ชีวิตและอบรมขัดเกลาให้ผู้วิจัยเป็นคนดี มีความรู้ ค่อยเป็นกำลังใจ ให้ความรักและความห่วงใย ขอบคุณคุณอาจารย์ฯ อังฉกรรจ์ ภรรยา และ ด.ช.ญาณภัทร อังฉกรรจ์ ลูกชาย ที่ค่อยเป็นกำลังใจสำคัญ ดูแลเอ้าใจใส่ ความเป็นอยู่อย่างใกล้ชิด และสนับสนุนในการศึกษามาตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาทุกคน รวมถึงบุคคลอื่น ๆ ซึ่งมิได้อยู่นามในที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ปรึกษา และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมา

(นายจันทร์เพ็ง อังฉกรรจ์)

ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง	การจำลองพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยในสสารไฟฟ้ากระแสสลับ	
โดย	นายจันทร์เพ็ง อังจกรรจ	
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	
สาขาวิชา	ฟลิกส์ [ISBN 974-523-125-8]	
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนินทร์ นุตโยว	
ศัพท์สำคัญ	ระบบอนุภาคแขวนลอย ขั้นคุ่ทางไฟฟ้า อันตรกิริยะระหว่างคู่ขั้วไฟฟ้า หนึ่งปัจจัย การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์	

ได้ศึกษาพฤติกรรมของระบบอนุภาคแขวนลอยแบบ solid-in-liquid ในสสารไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งแสดงผลการจำลอง ณ เวลาจริง โดยเขียนโปรแกรมขึ้นเองด้วยภาษาซี บนระบบปฏิบัติการลินักซ์ และใช้ Xgraphics ซึ่งเป็น graphic library สำหรับแสดงผลเชิงกราฟฟิกบน X-Windows ในการศึกษาสมมติให้เป็นระบบที่อนุภาคไม่ก้า Thompson ขนาดเท่ากัน รัศมี  $1.5 \times 10^{-6}$  m กระจายตัวในน้ำ ภายใต้สสารไฟฟ้ากระแสสลับสมำเสมอ ขนาด 7500 V/m ความถี่ 1000 Hz จากการจำลอง พบร่วงหลังจากเวลาผ่านไป  $1.0 \times 10^6$  time steps ( $\Delta t = 0.001$  s) หรือ 16 นาที 40 วินาที จะเกิดการจัดเรียงตัวกันของอนุภาคแขวนลอย โดยมีโครงสร้างเป็นແນບ ๆ หรือเป็นແບນໂซ์ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการศึกษาด้วยการทดลอง

## ABSTRACT

THESIS TITLE : COMPUTER SIMULATION OF BEHAVIOR OF COLLOIDAL PARTICLES  
IN ALTERNATING ELECTRIC FIELD

BY : CHANPENG ANGCHAKAN

DEGREE : MASTER DEGREE OF SCIENCE (PHYSICS)

MAJOR : PHYSICS [ISBN 974-523-125-8]

CHAIR : ASST.PROF.TANIN NUTARO, Ph.D

KEYWORDS : COLLOIDAL SYSTEM / ELECTRIC DOUBLE LAYER / INDUCE DIPOLE-  
INDUCE DIPOLE INTERACTION / COMPUTER SIMULATION

We have performed a real-time visualization for studying the behavior of a solid-in-liquid colloidal system of mica spheres suspended in water under the influence of an AC electric field numerically. The computer code was written in C programming under Linux operating system Xgraphics library was used to display for X-Windows on a personal computer. In this simulation, we supposed that each particle was hard sphere and had the same size  $1.5 \times 10^{-6}$  m subjected to a uniform external AC electric field 7500 V/m and 1000 Hz of frequency. The simulation after  $1.0 \times 10^6$  time steps ( $\Delta t = 0.001$  s) or 16 minutes 40 seconds, show the formation of stripe-like or chain structure of the particles, in agreement well with experiments.

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	น
บทที่	
<b>1. บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
1.5 โครงสร้างของรายงานการวิจัย	4
<b>2. ระบบอนุภาคแขวนลอยและอันตรกิริยาที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ระบบอนุภาคแขวนลอย (Colloidal System)	5
2.2 ชั้นคู่ทางไฟฟ้า (Electrical double layers)	6
2.3 ทฤษฎี ดี.แอล.วี.โอล (DLVO Theory)	7
2.4 สถานะโพลาไรซ์ของชั้นคู่ทางไฟฟ้า (Polarized state of the Electrical Double Layers)	9
2.5 อันตรกิริยะระหว่างคู่ชั้นไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce dipole-induce Dipole Interaction)	12
2.6 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในของเหลว (The motion of the particles in a fluid)	15
<b>3. การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์</b>	
3.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสสลับ	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การจำลองพุติกรรมของอนุภาคเชิงลอยในสนามไฟฟ้า กระแสน้ำ	21
4. ผลการจำลอง	23
5. สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปและอภิปรายผลการจำลอง	27
5.2 ข้อเสนอแนะ	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	
ก วิธีของอยเลอร์ (Euler's Method)	32
ข Xgraphics Library	35
ค Source Code ของโปรแกรม	41
ประวัติผู้วิจัย	56

## สารบัญภาพ

	หน้า
<b>ภาพที่</b>	
2.1 ชั้นคู่ทางไฟฟ้ารอบอนุภาค	7
2.2 กลไกการโผลาเรซซ์ของชั้นคู่ทางไฟฟ้า	10
2.3 อันตรกิริยะระหว่างอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่อยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้า	12
2.4 torque บนคู่ชี้ไฟฟ้า	13
2.5 free body diagram ของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อวัตถุซึ่งคงลงในของเหลว	15
3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	18
3.2 ลำดับขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมของอนุภาคแขนงลอยภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสสัลบคิวบิชีเริงเลข	22
4.1 แสดงการกระจายและการจัดเรียงของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นและหลังการจำลอง $1.0 \times 10^6$ time steps เมื่อกำหนดให้แต่ละอนุภาคมีจุดศูนย์กลางห่างกัน $5.0 \times 10^{-6}$ m	23
4.2 แสดงการกระจายและการจัดเรียงของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นและหลังการจำลอง $1.0 \times 10^6$ time steps เมื่อกำหนดให้แต่ละอนุภาคมีจุดศูนย์กลางห่างกัน $10.0 \times 10^{-6}$ m	24
4.3 แสดงการกระจายและการจัดเรียงของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นและหลังการจำลอง $1.0 \times 10^6$ time steps เมื่อกำหนดให้แต่ละอนุภาคมีจุดศูนย์กลางห่างกัน $20.0 \times 10^{-6}$ m	25
4.4 แสดงการเปรียบเทียบการเรียงตัวของอนุภาคจากการจำลองและการทดลองจริง	26
ก1 แสดงลำดับขั้นตอนการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ตามวิธีของ Euler	34

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ระบบอนุภาคแขวนลอย (colloidal system) คือ ระบบซึ่งอนุภาคขนาดเล็ก (เดือนผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง  $10^{-9}$  ถึง  $10^{-6}$  เมตร) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในตัวกลาง ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส (Yue Hu, 1994 : 524) และถ้าตัวกลางเป็นของเหลวหรือแก๊ส เรียกระบบอนุภาคแขวนลอยนั้นว่า ของไหลเชิงซ้อน (complex fluids) (Colloid & Complex Fluids Laboratory, 2001 : [www.mece.ualberta.ca/~subir/CCFLab/page1.html](http://www.mece.ualberta.ca/~subir/CCFLab/page1.html)) เป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบซึ่งของแข็งกระจายในของเหลว และของแข็งกระจายในแก๊ส เนื่องจากเป็นระบบที่มีอثرทั่วไปทุกหนทุกแห่งทั้งในธรรมชาติ ในบรรษัทภคที่ห่อหุ้มโลก ในน้ำ และมีอยู่ในองค์ประกอบสำคัญของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ เชลล์ทุกชนิดในร่างกาย เช่น เลือดและของไหลทุกประเภทในร่างกาย (Tuberose Inc., 2005 : [tuberose.com/colloidal\\_system.html](http://tuberose.com/colloidal_system.html)) ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญเกี่ยวกับการคงอยู่ และคำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดรวมทั้งมนุษย์ นอกจากนี้ ความรู้เกี่ยวกับสมบัติของระบบอนุภาคแขวนลอย ยังมีความสำคัญต่อการพัฒนาองค์ความรู้และการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา ไม่ว่าจะเป็น วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ ระบบระดับไมโครและนาโน เทคโนโลยีเกี่ยวกับคิน ปิโตรเลียมและเคมีคัส เทคโนโลยีทางการแพทย์ ฯ และเครื่องสำอาง เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบอนุภาคแขวนลอย จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านต่าง ๆ ที่กล่าวมา

ในสภาวะทั่วไป อนุภาคแขวนลอยจะเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) ในตัวกลาง อันเป็นผลจากอันตรกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ electrodynamic ซึ่งเกี่ยวกับอันตรกิริยาวันเดอ华ลล์ (van der waals interaction) อันตรกิริยานี้องจากขนาดของอนุภาค (steric) อันตรกิริยานี้องจากไฟฟ้า (electrostatic) และอันตรกิริยาที่เกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคในตัวกลาง (Colloid & Complex Fluids Laboratory, 2001 : [www.mece.ualberta.ca/~subir/CCFLab/page1.html](http://www.mece.ualberta.ca/~subir/CCFLab/page1.html)) อันตรกิริยาเหล่านี้ อาจที่เป็นสาเหตุให้ระบบมีความเสถียรหรือเสียความเสถียร ดังนั้นจึงมีแนวคิดหลากหลายแนวคิดเพื่อที่จะควบคุมพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอย แนวคิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอย คือ การใช้สนามไฟฟ้า โดยเชื่อว่าอนุภาคแขวนลอยจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบมากขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าที่นิยมใช้คือ สนามไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจาก

สารานุภาพทางกายภาพและเคมีทางกลับไปกลับมา ทำให้ออนุภาคถูกสารานุภาพทางกายภาพและเคมีทางกลับไปกลับมาด้วยอัตราเท่ากับความถี่ของสารานุภาพดังนั้นจึงสมมุติว่าอนุภาคแขวนลอยถูกสั่นด้วยสารานุภาพด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของสารานุภาพ

ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของระบบอนุภาคแขวนลอย กำลังได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากระบบอนุภาคแขวนลอย เมื่อเร็วๆ นี้นักวิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยโตเกียวร่วมกับนักวิทยาศาสตร์ของ Institute of Colloid and Interface Science ประเทศญี่ปุ่น พยายามทำการทดลองเพื่อขัดเรียงอนุภาคแขวนลอย เพื่อใช้ช่องว่างระหว่างอนุภาคแขวนลอยที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในการปลูกสร้างโครงสร้างขนาดเล็กได้เป็นผลสำเร็จ (Masahiko Abe, et al., 2004 : 7021-7026) การศึกษาระบบอนุภาคแขวนลอยโดยการทดลองนั้น สามารถทำได้โดยการจัดให้ระบบอนุภาคแขวนลอย (ซึ่งโดยมากจะศึกษาระบบที่อนุภาคของแข็งแขวนลอยในน้ำ) อยู่ในสารานุภาพ แล้วสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง การศึกษาด้วยวิธีนี้จึงจำเป็นต้องใช้ผู้วิจัยที่มีความรู้ด้านความสามารถและทักษะสูง ต้องใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง ควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่อาจมีผลกระทบ ให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมจึงจะได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง ซึ่งหมายถึงต้องใช้งบประมาณจำนวนมากเพื่อที่จะศึกษาทดลอง ทางเลือกหนึ่งที่น่าจะแก้ปัญหานี้ได้ คือการศึกษาโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation)

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยภายใต้สารานุภาพทางกายภาพและเคมีทางกลับ ด้วยระเบียบวิธีเชิงเลข (numerical method) โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และเนื่องจากอันตรกิริยาที่กระทำบนแต่ละอนุภาคเป็นผลจากอันตรกิริยาต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น และขึ้นอยู่กับตำแหน่งของอนุภาค ณ เวลาใดๆ จึงเป็นการยากที่จะคำนวณอันตรกิริยาที่กระทำบนแต่ละอนุภาค ณ เวลาใดๆ ได้ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytic methods) เพื่อให้ได้คำตอบแม่นตรง (exact solutions) ดังนั้นในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยจึงใช้การประมาณด้วยวิธีเชิงเลข ด้วยวิธีของออยเลอร์ (Euler's method) โดยในการศึกษานี้ผู้วิจัยสมมติระบบที่ศึกษาเป็นระบบอนุภาคของแข็งแขวนลอยในน้ำ (aqueous dispersion) เนื่องจากเป็นระบบที่พบมากที่สุดภายในองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตและในสิ่งแวดล้อม โดยสมมติให้เป็นอนุภาคทรงกลม ขนาดเท่ากัน เคลื่อนที่ในระบบ X-Z และเขียนโปรแกรมขึ้นเองด้วยภาษาซีบนระบบปฏิบัติการ Linux ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้นจากการบูรณาการระบบปฏิบัติการ Unix โดยแจกจ่ายให้ใช้ฟรี พร้อมทั้งยังสนับสนุนการใช้งานแบบหลายงานพร้อมๆ กัน (multitasking) หลายคนพร้อมๆ กัน (multi-user) และมีระบบ X-Windows เช่นเดียวกับระบบปฏิบัติการ Windows ของ Microsoft จึงทำให้ Linux กำลังได้รับความสนใจ และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในประเทศไทยและทั่วโลก โดยเฉพาะ Linux TLE ซึ่งพัฒนาโดยกลุ่มโปรแกรมเมอร์ชาวไทย เพื่อให้เป็นระบบปฏิบัติการของคนไทย (วศิน เพิ่มทรัพย์)

และ ศิลารัตน์ รั่วรงค์สมบัติสกุล, 2542 : 17) โดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและแสดงผลการจำลอง เชิงกราฟิก ณ เวลาจริง (real-time visualization) ใน X-Windows ด้วย Xgraphics Library

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคเชวนลอยในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยการจำลอง ด้วยคอมพิวเตอร์

1.2.2 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองพฤติกรรมของอนุภาคเชวนลอยด้วย ภาษาซี บนระบบปฏิบัติการ Linux โดยแสดงผลเชิงกราฟิก ณ เวลาจริง ด้วย Xgraphics Libraries

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมอนุภาคเชวนลอยในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยพิจารณา เกณฑ์ระบบซึ่งเป็นของแข็ง เชวนลอยในของเหลว โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และแสดงผล เชิงกราฟิก ณ เวลาจริง ซึ่งในการจำลองนี้สมมติให้เป็นระบบซึ่งอนุภาคไม่กระทบกัน ขนาดเท่ากัน เชวนลอยในน้ำมายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับที่มีสมดุล 7500 V/m ความถี่ 1000 Hz ในสองมิติ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นเองด้วย ภาษาซี บนระบบปฏิบัติการ Linux และใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ผลจากการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยสามารถสังเกตพฤติกรรมของอนุภาคเชวนลอย ณ เวลาใด ๆ ได้อย่างชัดเจน เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบอนุภาคเชวนลอยในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองระบบอนุภาคเชวนลอยให้ใกล้เคียงกับสภาพ จริงในธรรมชาติมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการศึกษาในอนาคต และนำความรู้ ที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาในด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

## 1.5 โครงสร้างของรายงานการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการศึกษาสมบัติของระบบอนุภาคแขวนลอยในสนามไฟฟ้า กระแสสลับ โดยเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 นำเสนอที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

บทที่ 2 นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ได้แก่ ระบบอนุภาคแขวนลอย ชั้นคู่ทางไฟฟ้า ทฤษฎี DLVO สถานะโพลาไรซ์ของชั้นคู่ทางไฟฟ้า อันตรกิริยาระหว่างคู่ชั้นไฟฟ้าหนึ่งนำ และการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของไนล์

บทที่ 3 นำเสนอวิธีดำเนินการจำลองด้วยวิธีเชิงเลข และการแสดงผลการจำลองเชิงกราฟฟิก ณ เวลาจริง

บทที่ 4 นำเสนอผลการจำลอง ณ เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริง

บทที่ 5 นำเสนอการสรุปผล การอภิปรายผลการศึกษา ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษา ในต่อไปอนาคต

## บทที่ 2

### ระบบอนุภาคแขวนลอยและอันตรกิริยาที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากระบบพิจารณา เป็นระบบอนุภาคของแข็งแขวนลอยในของเหลว ภายใต้ สถานภาพธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลของแรงลัพธ์ อันเนื่องจากสถานภาพฟื้ฟื้น และการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของเหลว ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งของอนุภาคแขวนลอย ณ เวลาใด ๆ เปลี่ยนไป ในการอธิบายการเปลี่ยนตำแหน่งนี้ต้องอาศัยทฤษฎีต่าง ๆ ดังนี้

#### 2.1 ระบบอนุภาคแขวนลอย (Colloidal System)

วิชาเคมี แบ่งเป็น 3 สาขา ใหญ่ ๆ คือ เคมีอินทรีย์ (organic chemistry) ศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบของคาร์บอน เคมีอินทรีย์ (inorganic chemistry) ศึกษาเกี่ยวกับสารที่ไม่มีคาร์บอน เป็นองค์ประกอบ และเคมีของสารแขวนลอย (colloidal chemistry) ศึกษาทั้งเคมีอินทรีย์และเคมีอินทรีย์ ซึ่งอนุภาคของสารหนึ่งกระจายตัวในอีกสารหนึ่ง ภายใต้เงื่อนไข 2 ประการ คือ 1) ขนาดของอนุภาค และ 2) การกระจายของอนุภาคในตัวกลาง (Tuberose Inc., 2005 : [tuberose.com/colloidal\\_system.thml](http://tuberose.com/colloidal_system.thml))

ดังนั้นระบบอนุภาคแขวนลอย จึงประกอบด้วย สารชนิดใดชนิดหนึ่งซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ซึ่งมีขนาดเด่นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคระหว่าง 0.1 ถึง 0.001 ไมโครเมตร ประมาณ 30% กระจายในตัวกลาง ซึ่งมีประมาณ 70% ของระบบโดยปริมาตร ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่านี้ เรียกว่า สารแขวนลอย (suspensions) และถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่านี้ เรียกว่า สารละลาย (solution) โดยปกติอนุภาคจะไม่จับตัวกันและไม่สามารถแยกได้ด้วยวิธีธรรมชาติ จากที่กล่าวมา ทั้งหมด จะเห็น ระบบอนุภาคแขวนลอยต้องมีคุณสมบัติ 3 ประการ คือ 1) ประกอบขึ้นจากสารหลายชนิดซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) 2) ประกอบด้วยสารที่มีสถานะต่างกัน (multiphasic) และ 3) อนุภาคไม่ละลายในตัวกลาง (insoluble) คุณสมบัติเหล่านี้เองที่ทำให้ระบบอนุภาคแขวนลอย มีคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างจากสารอื่น ๆ (Dispersion Technology, Inc., 2004 : <http://www.dispersion.com>)

ระบบอนุภาคแขวนลอยอาจถูกทำลายได้ เมื่อจากอนุภาคร่วมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (จนเกินช่วงขนาดของอนุภาคแขวนลอย) และตกตะกอนแยกตัวออกจากตัวกลาง ซึ่ง เป็นผลมาจากการโน้มถ่วงของโลก โดยเฉพาะอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ ส่วนแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากการโพลาไรเซชันมีผลน้อยกว่า เมื่อจากแรงดึงดูด และแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค

อูในสภาวะสมดุลก่อนท่อน้ำภาคจะจับตัวกัน (Tuberose Inc. , 2005 : tuberose.com/colloidal\_system.thml) และเมื่อพิจารณาระบบของแข็งแหวนโลຍในของเหลว (sol) ซึ่งอยู่ในสภาวะโพลาไรซ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่มีข้อ จะทำให้เกิดชั้นของไอออน 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างกันรอบ ๆ อนุภาค เรียกชั้นของไอออนนี้ว่า ชั้นคู่ทางไฟฟ้า (electrical double layers)

## 2.2 ชั้นคู่ทางไฟฟ้า (Electrical double layers)

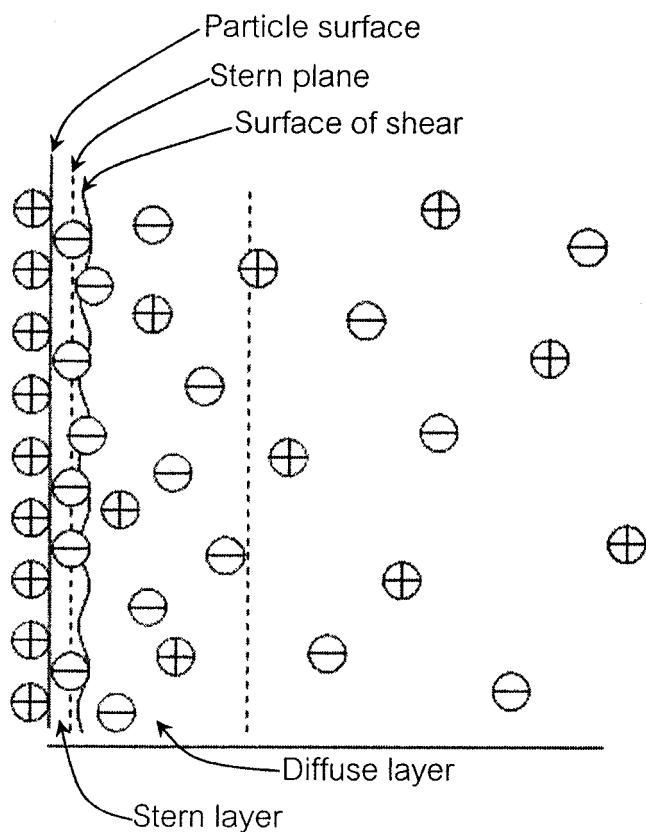
เมื่อพิจารณาระบบอนุภาคแข็งแหวนโลຍ ซึ่งในการวิจัยนี้สมมติให้เป็นระบบอนุภาคของแข็งทรงกลม (hard sphere particles) กระจายตัวในน้ำ แต่ละอนุภาคเป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับคงที่ (uniform AC electric field) แก่ระบบ จะทำให้แต่ละอนุภาคถูกเหนี่ยวนำให้เกิดคู่ขั้วทางไฟฟ้า (electrical dipole) จึงสมมุติว่าเป็นอนุภาคที่มีประจุ (like-charged particles) กระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่มีประจุไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการกระจุกตัว (concentration) ของประจุรอบ ๆ อนุภาค (ระหว่างประจุที่ผิวของอนุภาคและประจุของตัวกลาง) ทำให้เกิดชั้นความหนาแน่นของประจุบริเวณใกล้ ๆ ผิวของอนุภาค แตกต่างกันจนอยู่กับระยะห่างจากผิวของอนุภาค เรียกว่า ชั้นคู่ทางไฟฟ้า electrical double layers (Michael Pycraft Hughes, 2004 : <http://www.bath.ac.uk/>) ดังแสดงในภาพที่ 2.1

จากภาพแสดงให้เห็นว่า ชั้นคู่ทางไฟฟ้า ประกอบไปด้วยชั้นของประจุ 2 ชั้น คือ

2.2.1 Stern layer คือ ชั้นของประจุบริเวณใกล้ ๆ กับผิวของอนุภาค ประจุบริเวณนี้มีขนาดเท่ากับขนาดของประจุที่ผิวของอนุภาคแต่เป็นชนิดตรงกันข้าม ซึ่งเรียกว่า screening charge จึงทำให้ประจุรวม (net charge) เป็นศูนย์

2.2.2 Diffuse layer คือ ชั้นของประจุที่อยู่ติดอกไปจากผิวของอนุภาค ซึ่งมีทั้งประจุบวกและลบอยู่อย่างกระจายตัว เคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) แต่ยังมีความหนาแน่นของประจุค่อนข้างมาก (Brookhaven Instruments, 2005 : <http://www.brookhaven.co.uk/zeta-potential.html>)

ขนาดของศักย์ไฟฟ้านี้ค่ามากที่สุดที่บริเวณใกล้ผิวของอนุภาค มีค่าลดลงตามระยะห่างจากผิวของอนุภาค และความหนาของ screening layer เป็นพารามิเตอร์ที่สมมุติบอกถึงระยะที่แรงทางไฟฟ้าจากอนุภาคมีผลต่ออนุภาคอื่นที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎี DLVO (Derjaguin -Landau-Verway-Overbeek theory) (M. B. McBride and P. Baveye, 2002 : 1207-1217; Heng-Kwong Tsao, 1999 : 488-497)



ภาพที่ 2.1 ขั้นคุ่งทางไฟฟ้าบนอนุภาค

### 2.3 ทฤษฎีดี.แอล.วี.โอดี (DLVO Theory)

เมื่ออนุภาคเดินมีประจุ ซึ่งกระจายอยู่ในน้ำ 2 อนุภาคใด ๆ เคลื่อนที่เข้าใกล้กัน จะเกิดการซ้อนทับ (overlap) กันของ diffuse layer และสามารถพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคทั้งสองได้โดยอาศัยทฤษฎี DLVO ซึ่งพิจารณาแรงทางไฟฟ้าทั้ง แรงดึงดูด รวมทั้ง แรงวนเดอวัลล์ (van der waals) และแรงผลัก แต่เนื่องจากระบบอนุภาคเป็นสภาวะสมดุลของแรง อนุภาคจะกระจายตัวในตัวกลาง ไม่จับตัวกัน โดยทฤษฎีนี้จึงسمิโนว่าแรงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีเพียงแรงผลักเท่านั้น โดยแรงนี้เป็นแรงระยะใกล้ (short-range force) นั่นคือ เมื่ออนุภาคสองอนุภาคขังห่างกันจะยังไม่มีแรงผลักนี้ต่อเมื่ออนุภาคทั้งสองเข้าใกล้กันระยะหนึ่ง แรงนี้จึงจะมีอิทธิพลต่ออนุภาคทั้งสองเรียกระยะนี้ว่า Debye-Huckel screening length ( $K$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (Dispersion Technology, Inc., 2004 : <http://www.dispersion.com/>; Brookhaven Instruments, 2003 : <http://www.brookhaven.co.uk/zeta-potential.html>)

$$\kappa^2 = \frac{4\pi}{\epsilon_m k_B T} \sum_{\alpha} n_{\alpha} q_{\alpha}^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ

$K$	คือ Debye-Huckel screening length
$\epsilon_m$	คือ dielectric constant ของตัวกลาง
$k_B$	คือ Boltzmann constant
$\sum_{\alpha} n_{\alpha} q_{\alpha}^2$	คือ ขนาดประจุรวมรอบ ๆ อนุภาค

โดยอาศัยทฤษฎีนี้สามารถประมาณค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอบ ๆ ผิวของแต่ละอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับ Debye-Huckel screening length ได้โดยอาศัยสมการ Poisson-Boltzmann (Dispersion Technology, Inc., 2004 : <http://www.dispersion.com.>; Subir Bhattacharjee, et al., 1998 : 883-903) ได้ดังสมการ

$$\phi(r) = -\frac{Ze}{\epsilon_m} \frac{\exp(\kappa R)}{1 + \kappa R} \frac{\exp(-\kappa r)}{r} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$R$	คือ รัศมีของอนุภาค
$Z$	คือ Atomic number
$e$	คือ $1.602177 \times 10^{-19}$ C
$r$	คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของอนุภาคตามแนวรัศมี

และสามารถประมาณค่าพลังงานศักย์ไฟฟ้า  $U(r)$  ระหว่างคู่ของอนุภาค ได้ด้วยการอินทิเกรตเชิงผิว สมการที่ (2.2) โดยสมมติว่าผิวของทรงกลมที่สองไม่ได้ถูกซ้อนทับด้วยผิวทรงกลมที่หนึ่ง และ สมมติให้ทรงกลมทั้งสองมีจุดศูนย์กลางห่างกัน  $r$  จะได้

$$U(r) = \frac{Z^2 e^2}{\epsilon_m} \left[ \frac{\exp(\kappa R)}{1 + \kappa R} \right]^2 \frac{\exp(-\kappa r)}{r} \quad (2.3)$$

แรงผลักทางไฟฟ้าตามแนวรัศมีระหว่างอนุภาคสองอนุภาคที่เข้าใกล้กัน จึงสามารถประมาณได้โดย การหา negative gradient ของ  $U(r)$  จะได้

$$f_r^{rep} = \frac{Z^2 e^2}{\varepsilon_m} \left[ \frac{\exp(\kappa R)}{1 + \kappa R} \right]^2 \left( \frac{\kappa r + 1}{r^2} \right) \exp(-\kappa r) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $K$  สามารถหาได้จาก สมการที่ (2.1) และสามารถเขียนสมการที่ (2.4) อย่างง่ายได้เป็น

$$f_r^{rep} = A \left( \frac{\kappa r + 1}{r^2} \right) \exp(-\kappa(r - 2R)) \quad (2.5)$$

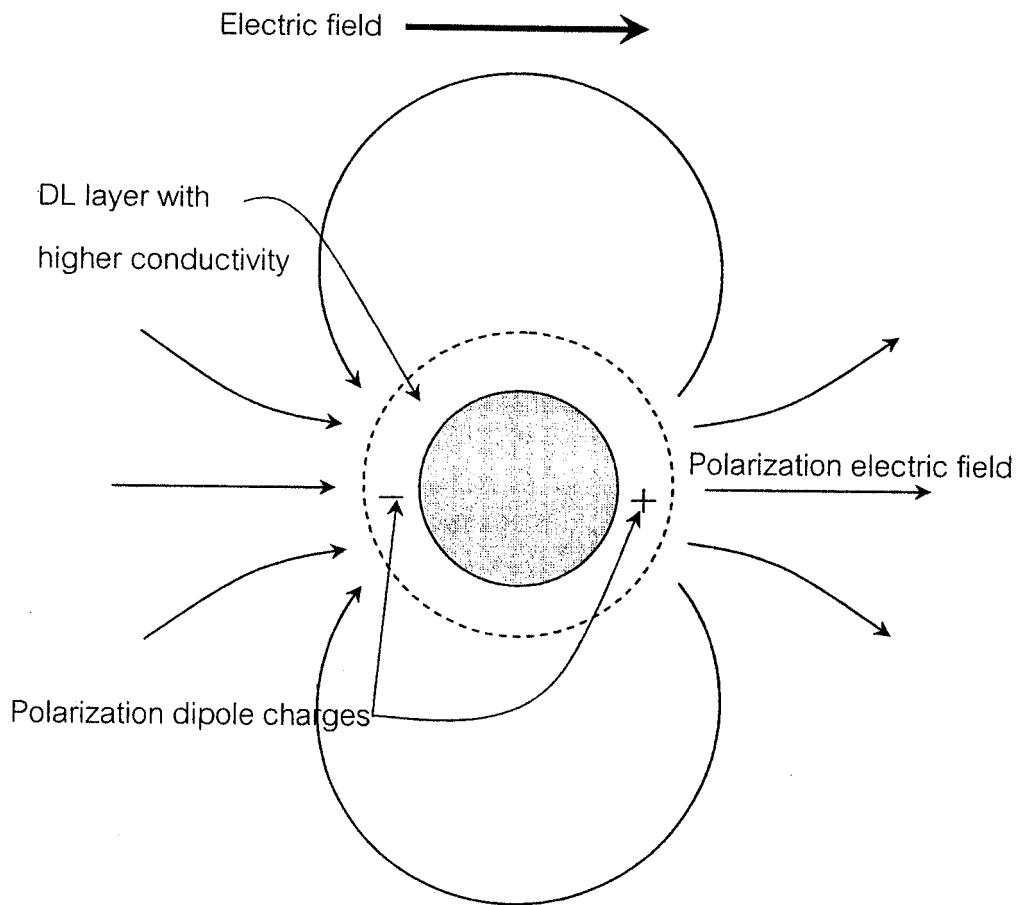
เมื่อ  $A$  นิยามจาก

$$A = \frac{Z^2 e^2}{\varepsilon_m} \left[ \frac{1}{1 + \kappa R} \right]^2$$

และเนื่องจากระบบอนุภาคแขวนลอยที่พิจารณาอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ส่งผลให้อนุภาคในระบบถูกเหนี่ยวนำให้เกิดคู่ชี้ว้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induce dipole) ดังนั้นอันตรกิริยาที่ต้องพิจารณา นอกจากแรงผลักทางไฟฟ้าตาม ทฤษฎี DLVO แล้ว ต้องพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างคู่ชี้ว้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induce dipole-induce dipole interactions) ที่เกิดขึ้นด้วย

#### 2.4 สถานะโพลาไรซ์ของชั้นคู่หางไฟฟ้า (Polarized state of the Electrical Double Layers)

เมื่อพิจารณาแต่ละอนุภาคและตัวกลางที่ล้อมรอบอนุภาคนั้นซึ่งอยู่ในสภาพ double layers ภายใต้สนามไฟฟ้า พบว่า สนามไฟฟ้าจะทำให้โครงสร้างของ double layers เปลี่ยนจากสถานะสมดุล (equilibrium state) ไปสู่สถานะโพลาไรซ์ (polarized state) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 จากภาพแสดงให้เห็นว่า ผลกระทบของสนามไฟฟ้าจะทำให้ประจุบวก (positive charge) เคลื่อนไปอีกันทางด้านขวาของอนุภาค และประจุลบ (negative charge) เคลื่อนไปอีกันทางด้านซ้ายของอนุภาค ทำให้อนุภาคเกิดลักษณะเป็นคู่ชี้ว้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induce electric dipole) และมีโมเมนต์คู่ชี้ว้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induce electric dipole moment)  $\bar{\mu}$  (Dispersion Technology, Inc., 2004 : <http://www.dispersion.com/>) โดยมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field strength,  $\bar{E}$ ) ดังสมการ (X.-B. Wang, et al., 1994 : 774–775)



ภาพที่ 2.2 กลไกการโพลาไรซ์ของชั้นคู่ทางไฟฟ้า

$$\bar{\mu}(\omega) = 4\pi\epsilon_0\epsilon_m R^3 K(\omega) E \bar{a}_z \quad (2.6)$$

โดยที่

$$K(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{2\epsilon_m^* + \epsilon_p^*} \quad \text{คือ Clausius-Mossotti factor}$$

เมื่อ

$\epsilon_m^*$  คือ complex permittivity ของตัวกลาง

$\epsilon_p^*$  คือ complex permittivity ของอนุภาค

และ

$$\varepsilon^* = \varepsilon - \frac{\sigma}{\omega} i$$

เมื่อ

$\varepsilon$  คือ permittivity ของสาร

$\sigma$  คือ conductivity ของสาร

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency) ของสนามไฟฟ้า

และสามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้า (electric potential,  $V$ ) ได้จากสมการ (Michael Pycraft Hughes, 2004 : <http://www.bath.ac.uk/>.)

$$V = \frac{\mu \cos \theta}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_m r^2} \quad (2.7)$$

นอกจากนี้ จากภาพที่ 2.2 ยังแสดงให้เห็นว่า จุดใดๆ ในรูปที่ 2.2 ที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางไปทางขวาจะมีค่า  $V$  ที่ต่ำกว่าค่า  $V$  ที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางไปทางซ้าย ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้น จึงสามารถใช้สมการ (2.7) คำนวณค่า  $V$  ที่ต้องการได้โดยการหา negative gradient ของ  $V$  ในแต่ละองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าได้ตามสมการ (W. T. Scott, 1959 : 95–102; David J. Griffiths, 1989 : 158–165)

$$\bar{E}_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{2\mu \cos \theta}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_m r^3} \quad (2.8)$$

และ

$$\bar{E}_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{\mu \sin \theta}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_m r^3} \quad (2.9)$$

ดังนั้น ความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ระยะ  $r$

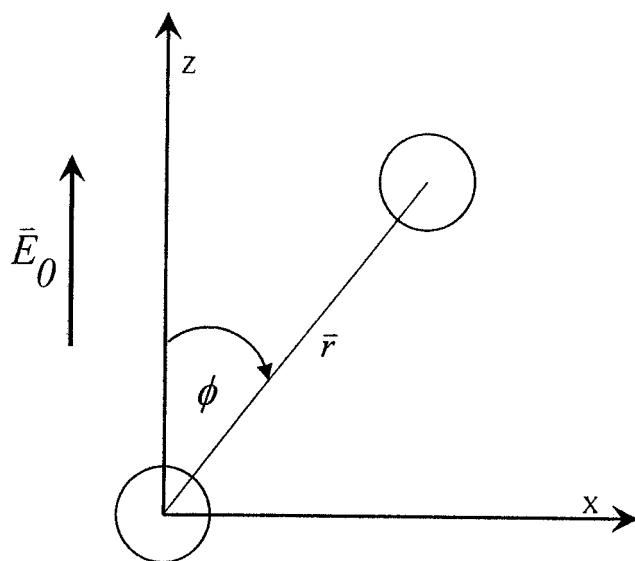
$$\bar{E} = \frac{\mu}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_m r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \quad (2.10)$$

เมื่อ	$\bar{r}$	คือ	ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอนุภาคถึงตำแหน่งที่พิจารณา
	$\theta$	คือ	มุมระหว่าง $\bar{r}$ กับ $\bar{r}$

และเมื่อพิจารณาอนุภาคแต่ละคู่พบว่า แต่ละอนุภาคจะได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าหนึ่งที่ขึ้นนำที่เกิดจากอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียง (neighbouring particles) ซึ่งพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

### 2.5 อันตรกิริยาระหว่างคู่ขั้วไฟฟ้าหนึ่งที่ขึ้นนำ (Induce dipole-induce dipole Interaction)

เมื่ออนุภาคแขวนลอยที่มีสภาพเป็นคู่ขั้วหนึ่งที่ขึ้นนำสองอนุภาคเข้าใกล้กันสามารถพิจารณาผลของแรงบนอนุภาคที่ 2 เนื่องจากอนุภาคที่ 1 ได้จากการที่ 2.3 (Yue Hu, 1994 : 524–529)



ภาพที่ 2.3 อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่อยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้า

จากการที่ 2.3 อนุภาครัศมี  $R$  ส่องอนุภาค มีค่า complex permittivity  $\epsilon_p^*$  กระจายในตัวกลางที่มี complex permittivity  $\epsilon_m^*$  ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ  $\bar{E}_0$  ซึ่งความถี่เชิงมุม  $\omega$  โดยอนุภาคที่ 1 อยู่ที่จุดกำเนิด และอนุภาคที่ 2 อยู่ในระนาบ X-Z จุดศูนย์กลางของอนุภาคทั้งสองห่างกัน  $\bar{r}$  แรงที่กระทำบนอนุภาคที่ 2 เนื่องจากอนุภาคที่ 1 สามารถพิจารณาจากสมการที่ (2.6) ถ้าโมเมนต์คู่ขั้วไฟฟ้าหนึ่งที่ขึ้นนำมีเฟส (phase shift) ตามหลังสนามไฟฟ้าอยู่  $\delta$  และถ้าสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาตามสมการ  $\bar{E} = \bar{E}_0 \exp(i\omega t)$  ดังนั้นโมเมนต์คู่ขั้วไฟฟ้าหนึ่งที่ขึ้นนำจะเปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$\begin{aligned}\bar{\mu} &= \beta \bar{E}_0 \exp(i(\omega t - \delta)) \\ &= \beta \bar{E} \exp(-i\delta)\end{aligned}\quad (2.11)$$

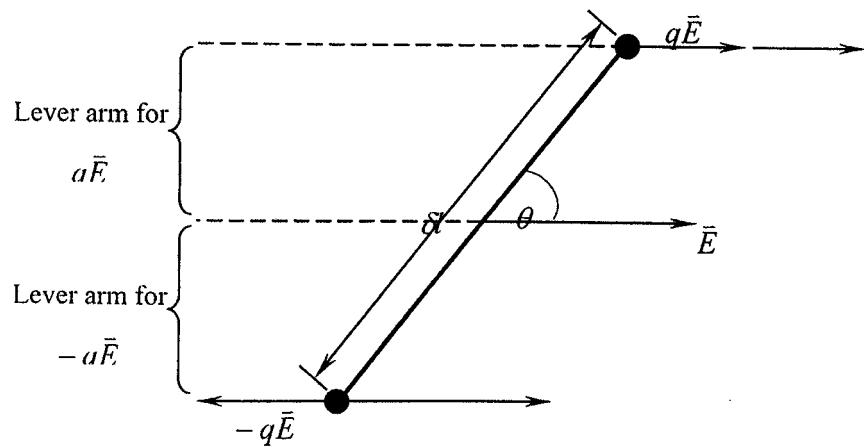
เมื่อ

$$\beta = 4\pi\epsilon_m R^3 K(\omega)$$

จะได้ผลลัพธ์งานศักย์ไฟฟ้าของโมเมนต์คู่รั้งไวไฟฟ้าเหนี่ยววนนำมีค่า (X.-B. Wang, et al., 1994 : 774–775; Yue Hu, 1994 : 524–529)

$$U(r, \phi) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(-\bar{\mu} \cdot \bar{E}) \quad (2.12)$$

เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาค มีทั้งสนามไฟฟ้าภายนอก และสนามไฟฟ้าเหนี่ยววนนำอันเนื่องมาจากการที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้โมเมนต์คู่รั้งไวไฟฟ้าเหนี่ยววนนำบนแต่ละอนุภาคทำงานกับทิศของสนามไฟฟ้าภายนอก ส่งผลให้แต่ละอนุภาคมีทั้งการเดือนตำแหน่ง (translation) และการหมุน (rotation) ไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งเรารามารถพิจารณา ทอร์ก (torque,  $\bar{\Gamma}_{el}$ ) ของอนุภาคที่เป็นคู่รั้งไวไฟฟ้าเหนี่ยววนนำ ได้ดังภาพที่ 2.4 (W. T. Scott, 1959 : 95–102; Claudio Scherer, 2004 : 442–447)



ภาพที่ 2.4 torque บนคู่รั้งไวไฟฟ้า

และสามารถหาข้าคของ  $\bar{\Gamma}_{el}$  ดังกล่าวได้จากสมการ

$$\bar{\Gamma}_{el} = \bar{\mu} \times \bar{E} \quad (2.13)$$

และแรงที่ทำให้อนุภาคลดเลือนคำแห่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{F} = \bar{\nabla} \frac{1}{2} (\bar{\mu} \cdot \bar{E}) \quad (2.14)$$

เมื่อ factor  $1/2$  เป็นผลเนื่องมากอันตรกิริยาระหว่างคู่ชี้วิฟพีเอนี่บวน (J. D. Jackson, 1975 : 158-161) และเมื่อแทนค่า  $\bar{E} = \bar{E}_0 \exp(i\omega t)$  และ  $\bar{\mu}$  จากสมการที่ (2.11) ลงใน สมการที่ (2.14) โดยพิจารณาแรงคงค์ประกอบในระบบพิกัดเชิงขั้วสองมิติ  $(r, \theta)$  ตามสมการที่ (2.8), (2.9) จะได้

$$\begin{aligned} \bar{F}_{ind}(r) = & \frac{1}{4\pi \operatorname{Re}(K(\omega)) \varepsilon_m r^4} [\sin \theta \cos \theta \sin 2\gamma + \\ & (3 \cos^2 \theta - 1) \cos^2 \gamma (1 + \cos 2\delta) + \\ & (3 \sin^2 \theta - 1) \sin^2 \gamma (1 - \cos 2\delta)] \end{aligned} \quad (2.15)$$

และ

$$\begin{aligned} \bar{F}_{ind}(\theta) = & \frac{1}{4\pi \operatorname{Re}(K(\omega)) \varepsilon_m r^4} [(2 \sin^2 \theta - 1) \sin 2\gamma + \\ & \sin 2\theta (\cos 2\gamma + \cos 2\delta)] \end{aligned} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$\operatorname{Re}(K(\omega))$  คือ real path of Clausius-Mossotti factor

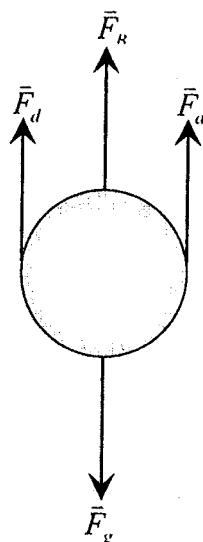
$\gamma$  คือ มุนระหว่างทิศของโนเมนต์คู่ชี้วิฟพีเอนี่บวนกับทิศของสนามไฟฟ้าภายนอก

เนื่องจากอนุภาคลดเลือนที่ในตัวกลางซึ่งเป็นของเหลว จึงต้องพิจารณาอันตรกิริยาที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคนในตัวกลางที่เป็นของไอลด้วย

## 2.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในของเหลว (The motion of the particles in a fluid)

เราสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของเหลว (ซึ่งในการทดลองนี้คือน้ำ) ภายใต้สนามโน้มถ่วง (gravitational field) ได้โดยอาศัยกฎของสโต๊ก (Stoke's law)

จากภาพที่ 2.5 แสดง อนุภาคมวล  $m$ , รัศมี  $R$ , ความหนาแน่น  $\rho_p$  กำลังเคลื่อนที่ในของเหลวที่มีความหนาแน่น  $\rho_f$  มีแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนอนุภาค ได้แก่ แรงโน้มถ่วง (gravitational force,  $\bar{F}_g$ ) แรงลอยตัว (buoyant force,  $\bar{F}_B$ ) และ แรงหนึด (drag force,  $\bar{F}_d$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้



ภาพที่ 2.5 free body diagram ของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อวัตถุซึ่งคงลงในของเหลว

$$\begin{aligned}\bar{F}_g &= m \cdot \bar{g} = \rho_p \cdot V_p \cdot \bar{g} \\ &= \rho_p \cdot \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) \cdot \bar{g}\end{aligned}\quad (2.17)$$

$$\bar{F}_B = \rho_f \cdot \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) \cdot \bar{g} \quad (2.18)$$

สำหรับแรงหนึด ซึ่งเป็นแรงต้าน (frictional force) อันเนื่องมาจากการไหลของของเหลวผ่านผิวของอนุภาค มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนของอนุภาคในของเหลว ขนาดของอนุภาค และความหนืด

(viscosity,  $\eta$ ) ของของไอล สำหรับวัตถุทรงกลมสามารถคำนวณโดยอาศัยกฎของสโต๊กได้จากสมการ

$$\bar{F}_D = 6\pi\eta R\bar{v} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$\bar{v}$  คือ ความเร็วของอนุภาค

$\eta$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไอล

ดังนั้นแรงลัพธ์ที่กระทำบนอนุภาคจึงมีค่าเท่ากับ

$$\bar{F} = \bar{F}_g - (\bar{F}_B + \bar{F}_D) \quad (2.20)$$

$$= \rho_p \cdot \left( \frac{4}{3}\pi R^3 \right) \cdot \bar{g} - \rho_f \left( \frac{4}{3}\pi R^3 \right) \cdot \bar{g} - 6\pi\eta R\bar{v} \quad (2.21)$$

$$= (\rho_p - \rho_f) \cdot \left( \frac{4}{3}\pi R^3 \right) \cdot \bar{g} - 6\pi\eta R\bar{v} \quad (2.22)$$

และโดยอาศัยกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) จะได้

$$\sum \bar{F} = m \left( \frac{d\bar{v}}{dt} \right) \quad (2.23)$$

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{1}{m} \cdot \left[ (\rho_p - \rho_f) \cdot \left( \frac{4}{3}\pi R^3 \right) \cdot \bar{g} - 6\pi\eta R\bar{v} \right] \quad (2.24)$$

และเนื่องจากอนุภาคมีการหมุนอันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่เกิดจากโนเมนต์คู่ชี้วิไฟฟ้าแทนี่ยวนำทำหมุนกับสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้ของไอลออกแรงต้านการหมุนนี้ด้วยตามสมการ (L. D. Landau and E. M. Lifshitz, 1987 : 63–68)

$$\bar{\Gamma}_{fric} = -8\pi\eta\bar{\Omega}R^3 \quad (2.25)$$

เมื่อ

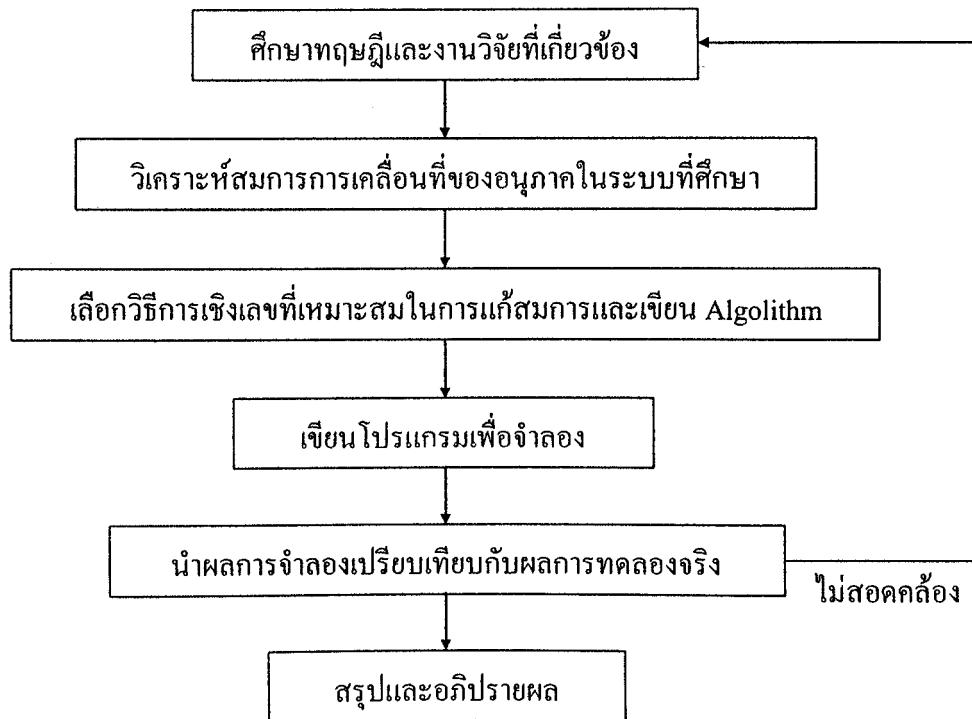
$\bar{\Omega}$  คือ อัตราเร็วเชิงมุม (angular velocity) ของอนุภาค

จากการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ทำให้ทราบถึงธรรมชาติของอนุภาค แขนงลอย และอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของอนุภาคแขนงลอยอันเนื่องมาจากการ ภายนอกทั้งสามมิติ ไฟฟ้าและสนามโน้มถ่วง รวมถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาดของ อนุภาค ความถี่ของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ทำให้สามารถจำลองพฤติกรรมของอนุภาคแขนงลอยด้วย คอมพิวเตอร์โดยอาศัย วิธีการเชิงเลข (numerical method) ได้ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทต่อไป

### บทที่ 3

## การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

การวิจัยในครั้งนี้ เป็นการจำลองพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยในของเหลวภายในช่องไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นการพิจารณาผลของแรงกระทำจากสนามภายนอกทั้งสนามไฟฟ้า และสนามโน้มถ่วง ในขณะเดียวกันแต่ละอนุภาคก็ได้รับแรงกระทำจากอนุภาคอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้ ๆ เป็นผลทำให้อนุภาคเปลี่ยนตำแหน่งไปตามผลของแรงดึงดักล่าม การจำลองจึงเป็นการคาดคะเนตำแหน่งของแต่ละอนุภาค ณ เวลาใด ๆ ซึ่งเป็นการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations: ODE) ด้วยวิธีเชิงเลข และแสดงผลการจำลองเชิงกราฟฟิกสองมิติ ณ เวลาจริง (Real-time visualization) เพื่อให้สามารถสังเกตพฤติกรรมของอนุภาคได้ง่าย และเพื่อให้แน่ใจว่าผลการจำลองถูกต้อง จึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ท่านอื่น ๆ ที่ได้ทำการทดลองไว้แล้ว ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยพื้นฐานได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในน้ำภายในไฟฟ้ากระแสสลับ

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในน้ำภายในไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ละอนุภาคจะได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าและสนามโน้มถ่วง ทำให้มีการเคลื่อนที่และหมุนในขณะเดียวกัน ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังกล่าวจึงอาจพิจารณาได้ดังนี้

พิจารณาแรงลัพธ์ที่กระทำบนแต่ละอนุภาคของเชิงทรงกลม ซึ่งในการจำลองนี้สมมติให้เป็นอนุภาคไม่ก้าน รัศมี  $R$  มวล  $m$  ความหนาแน่น  $\rho_p$  กระจายตัวอยู่ในน้ำ ความหนาแน่น  $\rho_w$  ภายในไฟฟ้ากระแสสลับขนาดสี่เหลี่ยม  $E_0$  ในทิศทางตามแกน Z โดยอาศัยกฎข้อที่ 2 ของ Newton จากสมการ (2.23) จะได้

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F}_{ind} + \bar{F}_{DLVO} + \bar{F}_g + \bar{F}_B + \bar{F}_D \quad (3.1)$$

เมื่อ	$\bar{F}_{ind}$	คือ แรงกระทำเนื่องมาจากการคู่ข้ามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
	$\bar{F}_{DLVO}$	คือ แรงกระทำตามทฤษฎี DLVO
	$\bar{F}_g$	คือ แรงกระทำอันเนื่องมาจากการโน้มถ่วงของโลก
	$\bar{F}_B$	คือ แรงคลอยด์
	$\bar{F}_D$	คือ แรงต้านอันเนื่องมาจากการของไอล

เพราะว่าอนุภาคมีขนาดเล็กมาก (เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง  $10^{-9}$  ถึง  $10^{-6}$  เมตร) และมวลของอนุภาคมีค่าน้อยมาก ทำให้เทอม  $md\bar{v}/dt$ ,  $\bar{F}_g$  และ  $\bar{F}_B$  มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่น ๆ ดังนั้นจึงอาจไม่ต้องนำมาพิจารณา จัดสมการใหม่ และแทน  $\bar{F}_D$  ด้วยสมการ (2.19) จะได้สมการการเคลื่อนที่เป็น

$$\bar{F}_{ind} + \bar{F}_{DLVO} - 6\pi\eta R\bar{v} = 0 \quad (3.2)$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$6\pi\eta R\bar{v} = \bar{F}_{ind} + \bar{F}_{DLVO} \quad (3.3)$$

จากสมการ (3.3) จะเห็นว่า ด้านซ้ายมือของสมการ คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากของไหล มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วเท่านั้น สามารถเขียนอย่างง่ายได้เป็น

$$B \frac{d\bar{r}}{dt} = \bar{F}_{ind} + \bar{F}_{DLVO} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $B = 6\pi\eta R$  โดยในการจำลองนี้สมมติให้  $R = 1.5 \times 10^{-6}$  เมตร  $\eta$  คือ ตัวประสิทธิ์ความหนืดของน้ำ มีค่า  $0.001002 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  (ที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$ ) และถ้าในระบบมีอนุภาค N อนุภาค แรงกระทำบนอนุภาคที่  $i$  เนื่องจากอนุภาคที่  $j$  สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$B \frac{d\bar{r}}{dt} = \sum_{i \neq j} \bar{F}_{ind}(i, j) + \sum_{i \neq j} \bar{F}_{DLVO}(i, j) \quad (3.5)$$

หรือจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{d\bar{r}}{dt} = \left( \frac{\sum_{i \neq j} \bar{F}_{ind}(i, j) + \sum_{i \neq j} \bar{F}_{DLVO}(i, j)}{B} \right) \quad (3.6)$$

สมการ (3.6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ ซึ่งบอกการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ณ เวลา  $dt$  และเมื่อตำแหน่งของแต่ละอนุภาคเปลี่ยนไป จะทำให้แรงลัพธ์บนแต่ละอนุภาคอันเป็นผลมาจากการอันตรกิริยาทางไฟฟ้าตามทฤษฎี DLVO ตามสมการ (2.5) และอันตรกิริยาระหว่างคู่ชั่วไฟฟ้านี้ยังนาตามสมการ (2.15) และ (2.16) ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาคเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อตำแหน่งใหม่ ดังนั้นจึงเป็นการยากมากที่จะคำนวณตำแหน่งของแต่ละอนุภาค ณ เวลาใด ๆ ด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์ (analytic method) เพื่อให้ได้คำตอบแม่นตรง (exact solutions) ในการจำลองจึงใช้การประมาณตำแหน่ง เมื่อเวลาผ่านไป  $\Delta t$  ด้วยวิธีของ Euler โดยกำหนดให้  $\Delta t = 0.001 \text{ s}$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์จำกัด (Finite Difference Equation: FDE) ได้ดังนี้

$$r_{n+1} = r_n + \Delta t(f_n) + O(\Delta t^2) \quad (3.7)$$

เมื่อ

- $r_n$  คือ ตำแหน่งของอนุภาค ณ เวลา  $n$   
 โดยที่  $r_0$  คือ ตำแหน่ง ณ เวลาเริ่มต้น ( $t = 0$ )  
 $r_{n+1}$  คือ ตำแหน่งของอนุภาค ณ เวลา  $n + 1$   
 $f_n$  คือ function ที่ส่งผลต่อตำแหน่งของอนุภาค ณ เวลา  $n$  ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่ง  
 ของอนุภาค  
 $O(\Delta t^2)$  คือ ความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณในแต่ละช่วงเวลา  $\Delta t$

และถ้าไม่คำนึงถึงความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณในแต่ละช่วงเวลา  $\Delta t$  จะได้สมการเชิงอนุพันธ์  
 จำกัดซึ่งนำไปใช้ในการประมาณตำแหน่งแต่ละอนุภาค ณ เวลาใด ๆ ตามวิธีของ Euler เป็น

$$\bar{r}_{n+1} = \bar{r}_n + \Delta t(f_n) \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\bar{r}_n$  และ  $\bar{r}_{n+1}$  คือ ตำแหน่งที่ได้จากการประมาณ ณ เวลา  $n$  และ  $n + 1$  ตามลำดับ

(J. D. Hoffman, 1993 : 240-241; อุดม ไบเจริญ, 2533 : 558-564)

### 3.2 การจำลองพุติกรรมของอนุภาคแบบลอยในสถานที่ไฟฟ้ากระแสสลับ

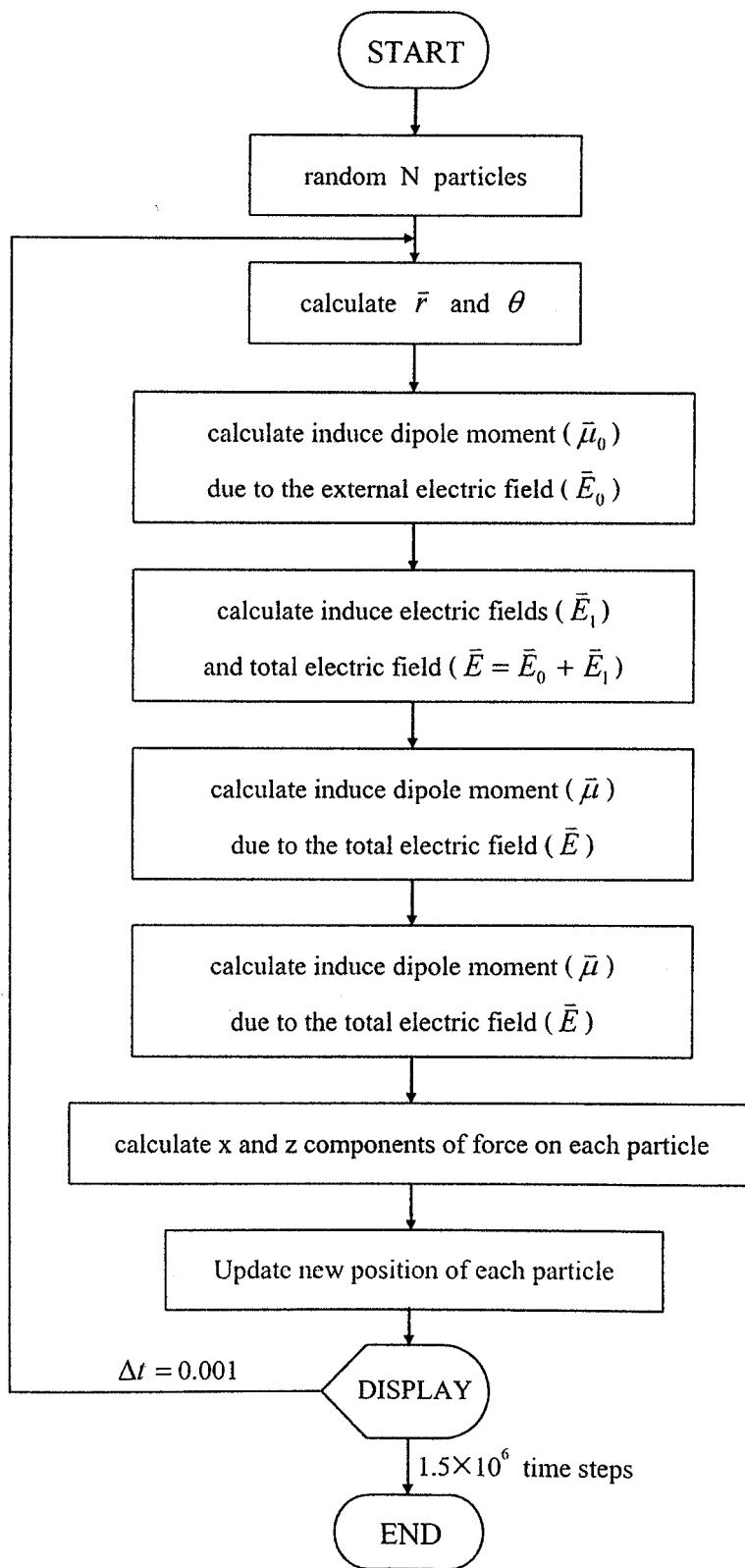
เมื่อวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค จนได้สมการ (3.8) ซึ่งเป็นสมการที่จะใช้  
 ในการพยากรณ์ตำแหน่งของแต่ละอนุภาค ณ เวลาใด ๆ แล้ว ก็สามารถจำลองพุติกรรมของอนุภาค  
 แบบลอยในสถานที่ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยคอมพิวเตอร์ได้ตามขั้นตอนดังนี้

3.2.1 สรุปตำแหน่งของอนุภาค N อนุภาค ใน 2 มิติ บนระนาบ X-Z โดยกำหนดให้แต่ละ  
 อนุภาคมีรัศมีเท่ากัน และไม่ให้มีการซ้อนทับ (overlap) กัน

3.2.2 คำนวณแรงในองค์ประกอบ X และ Z บนแต่ละอนุภาค ตามสมการ (2.5) (2.15)  
 และ (2.16)

3.2.3 พยากรณ์ตำแหน่งของแต่ละอนุภาค ณ แต่ละช่วงเวลา  $\Delta t$  น้อย ๆ (0.001 วินาที)  
 ด้วยวิธีของ Euler ตามสมการ (3.8) และแสดงผลเชิงกราฟฟิก ณ เวลาจริงทางภาพ โดยอาศัย  
 Xgraphics Library

3.2.4 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2) และ 3) ตามเวลาที่กำหนดซึ่งในการจำลองนี้ ทำซ้ำ  $1.0 \times 10^6$  ครั้ง  
 (คิดเป็นเวลาจริง 16 นาที 40 วินาที)

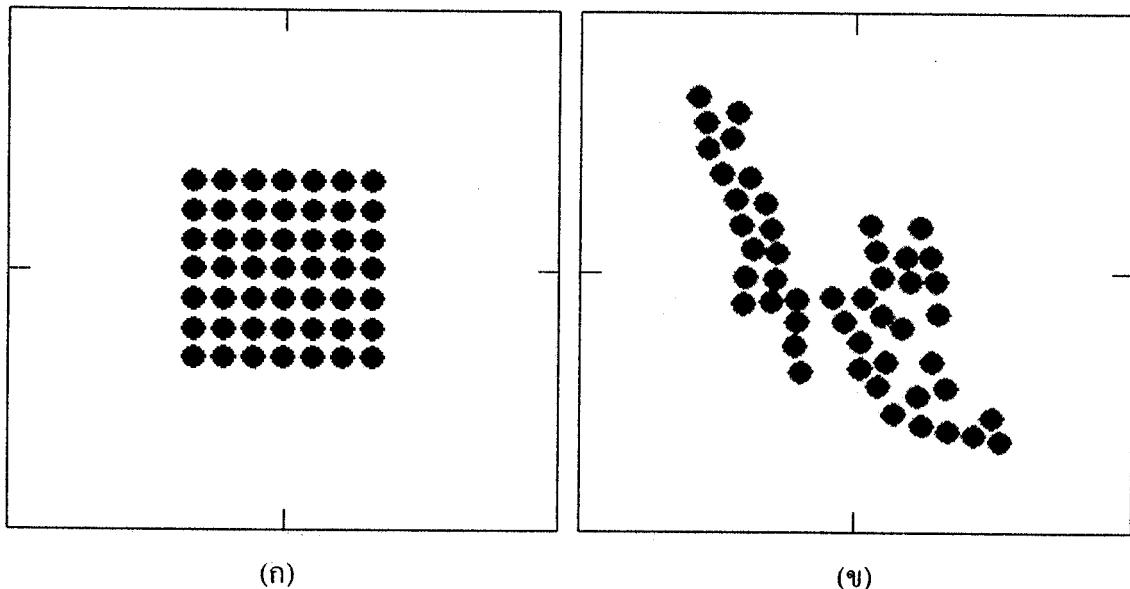


ภาพที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยภายในไฟฟ้ากระแสสลับ  
ด้วยวิธีเชิงเลข

## บทที่ 4

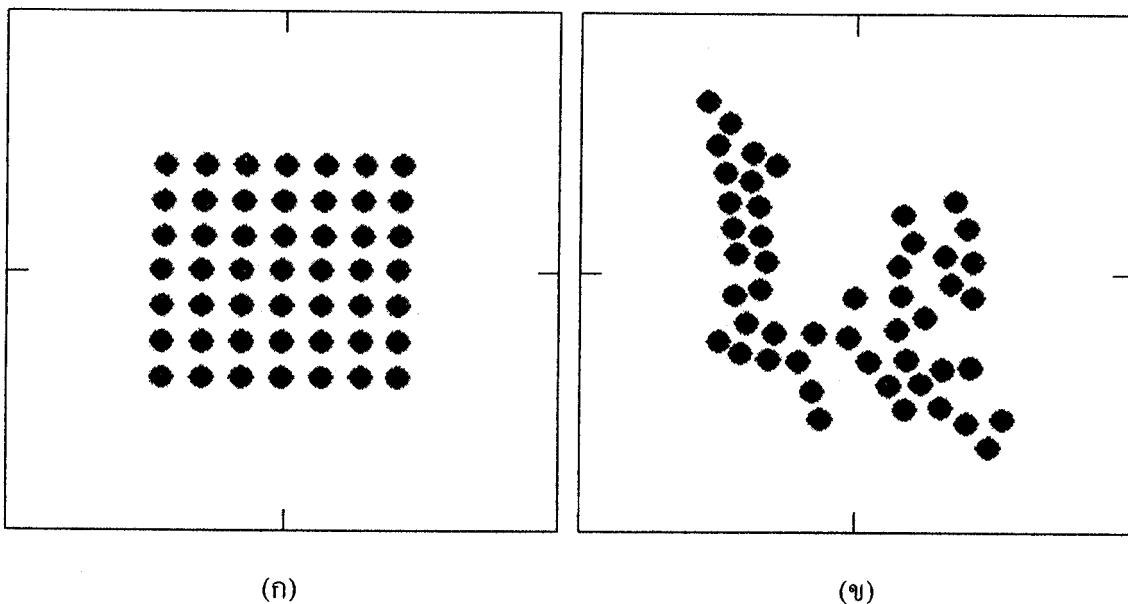
### ผลการจำลอง

จากการจำลองพุติกรรมอนุภาคไม้ก้าในน้ำภายในได้สำเนาไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น โดยสมมติให้ อนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเท่ากัน รัศมี  $1.5 \times 10^{-6}$  m ภายใต้สำเนาไฟฟ้ากระแสสลับสม่ำเสมอ ขนาด  $7500 \text{ V/m}$  ความถี่  $1000 \text{ Hz}$  สามารถแสดงผลการจำลอง ได้ดังนี้



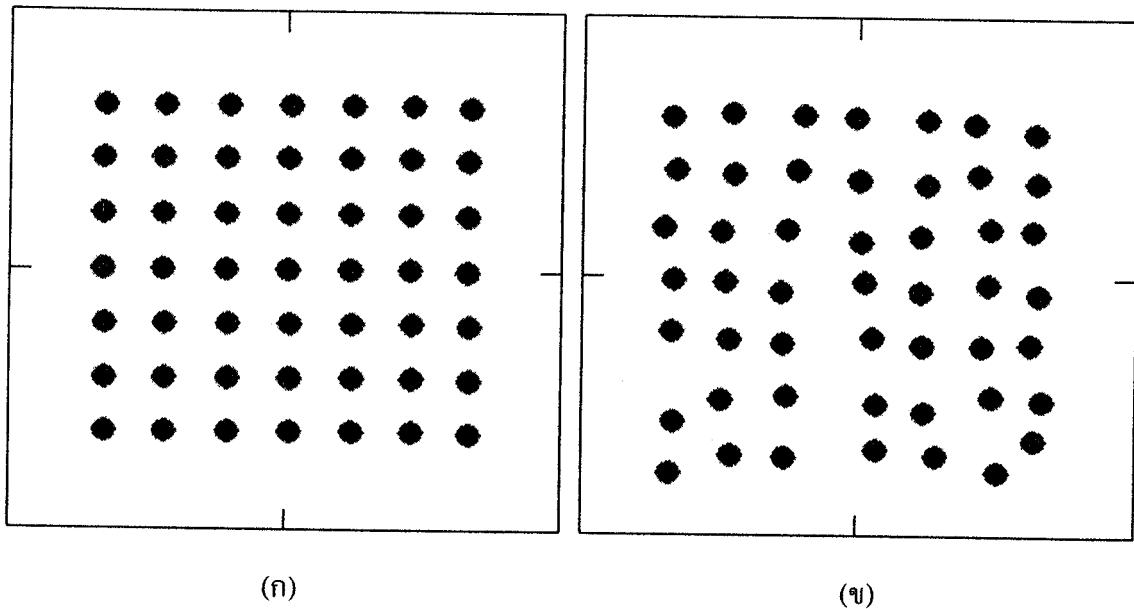
ภาพที่ 4.1 แสดงการกระจายและการจัดเรียงของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นและหลังการจำลอง  $1.0 \times 10^6$  time steps เมื่อกำหนดให้แต่ละอนุภาคมีจุดศูนย์กลางห่างกัน  $5.0 \times 10^{-6}$  m  
(ก) การกระจายอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นในการจำลอง  
(ข) การจัดเรียงของอนุภาค หลังการจำลอง  $1.0 \times 10^6$  time steps หรือเวลาจริง 16 นาที 40 วินาที

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า หลังการจำลองผ่านไป  $1.0 \times 10^6$  time steps หรือเวลาจริง 16 นาที 40 วินาที อนุภาคมีเรียงตัวโดยมีลักษณะเป็นเดบหรือเป็นโซ่



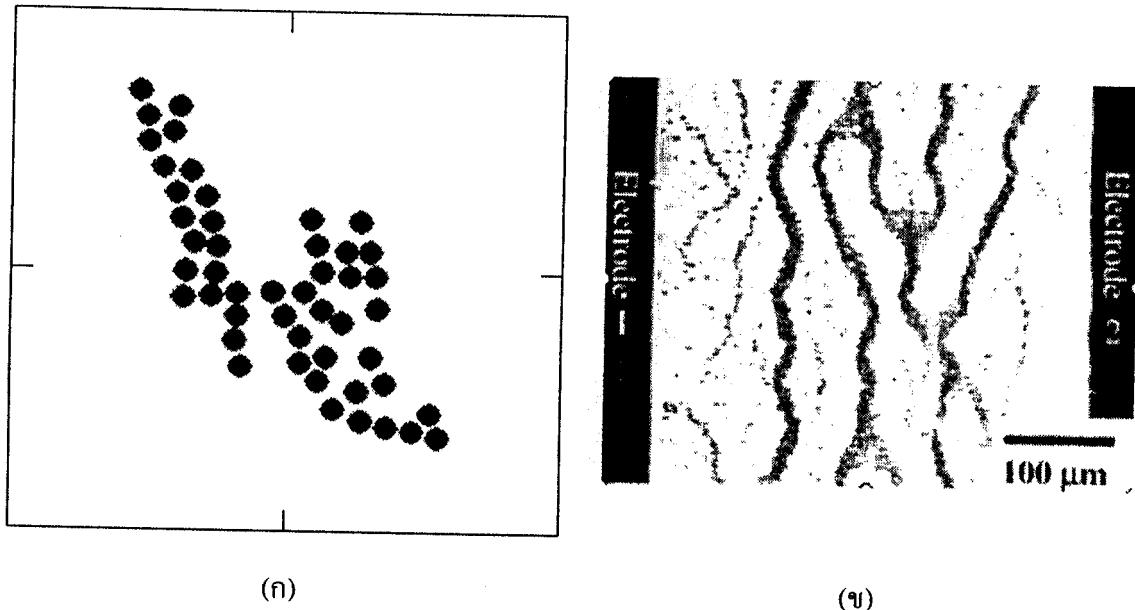
**ภาพที่ 4.2** แสดงการกระจายและการจัดเรียงของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นและหลังการจำลอง  $1.0 \times 10^6$  time steps เมื่อกำหนดให้แต่ละอนุภาคมีจุดศูนย์กลางห่างกัน  $10.0 \times 10^{-6}$  m  
 (ก) การกระจายอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นในการจำลอง  
 (ข) การจัดเรียงของอนุภาค หลังการจำลอง  $1.0 \times 10^6$  time steps หรือ เวลาจริง 16 นาที 40 วินาที

จากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า หลังการจำลองผ่านไป  $1.0 \times 10^6$  time steps หรือ เวลาจริง 16 นาที 40 วินาที อนุภาคมีการเรียงตัวโดยมีลักษณะเป็นแคนหรือเป็นโซ่ แต่ยังไม่แยกเป็นแคนชั้ดเจนนัก



**ภาพที่ 4.3** แสดงการกระจายและการจัดเรียงของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นและหลังการจำลอง  $1.0 \times 10^6$  time steps เมื่อกำหนดให้แต่ละอนุภาคมีจุดศูนย์กลางห่างกัน  $20.0 \times 10^{-6}$  m  
 (ก) การกระจายอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค ณ เวลาเริ่มต้นในการจำลอง  
 (ข) การกระจายของอนุภาค หลังการจำลอง  $1.0 \times 10^6$  time steps หรือ  
 เวลาจริง 16 นาที 40 วินาที

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า หลังการจำลองผ่านไป  $1.0 \times 10^6$  time steps หรือ เวลาจริง 16 นาที 40 วินาที อนุภาคยังไม่มีการจัดเรียงตัวเป็นແղນหรือโซ่อเดียวไร



ภาพที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบการเรียงตัวของอนุภาคจากการจำลองและการทดลองจริง

(ก) การจัดเรียงของอนุภาค หลังการจำลอง  $1.0 \times 10^6$  time steps หรือเวลาจริง

16 นาที 40 วินาที โดยกำหนดให้อนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและอยู่  
ห่างกัน  $5.0 \times 10^{-6}$  m

(ข) การเรียงตัวของอนุภาคซิลิค้า เส้นผ่าศูนย์กลาง  $2.0 \times 10^{-6}$  m ในน้ำ

ระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งวางห่างกัน  $400 \times 10^{-6}$  m ความต่างศักย์  $3.0 V_{rms}$

เป็นเวลา 10 นาที จากการทดลอง (Masahiko Abe, et al., 2004 : 7022)

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบอนุภาคแขวนลอย (ซึ่งในการจำลองนี้เป็นระบบ  
ของแข็งแขวนลอยในของเหลว) อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ อนุภาคแขวนลอยจะเรียงตัวใน  
ลักษณะเป็นแถบหรือเป็นโซ่ ซึ่งผลจากการจำลองสอดคล้องกับผลจากการทดลอง

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผลการจำลอง

จากผลการจำลองพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยในน้ำ ภายใต้สนานาไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิก พบว่า

5.1.1 โปรแกรมที่เขียนขึ้น สามารถจำลองและแสดงผลเชิงกราฟฟิกได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถสังเกตพฤติกรรมของอนุภาคแขวนลอยได้อย่างชัดเจนและต่อเนื่อง แต่ในการจำลองนี้ใช้จำนวนอนุภาคเพียง 50 อนุภาค และแสดงผลเชิงกราฟฟิกในสองมิติเท่านั้น ซึ่งในธรรมชาติระบบเป็นสามมิติ ทำให้ไม่สามารถสังเกตพฤติกรรมของอนุภาคในอิมิติหนึ่งซึ่งอาจมีการเรียงตัวที่แตกต่างออกไป

5.1.2 เมื่อการจำลองผ่านไป  $1.0 \times 10^6$  time steps โดยที่  $\Delta t = 0.001$  จะเกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคแขวนลอย โดยมีโครงสร้างเป็นແเกบ ๆ หรือเป็นโซ่ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Masahiko และคณะ (2004) ซึ่งได้ทดลองความคุณการจัดเรียงตัวของอนุภาคแขวนลอยในน้ำ ภายใต้สนานาไฟฟ้ากระแสสลับ แต่โซ่ของอนุภาคแขวนลอยที่ได้ขึ้นไม่ว่างตัวในแนวใดแนวหนึ่ง คือ ตั้งฉาก หรือขนานกับสนานาไฟฟ้าภายนอกอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการจำลองนี้ยังไม่ได้คิด spin (Yue Hu, 1994 : 526-527) และผลของการอันตรกิริยาเนื่องจากสนานาโน้มถ่วง บนอนุภาคแขวนลอย

5.1.3 เมื่อกำหนดให้ ณ เวลาเริ่มต้นการจำลอง อนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $5.0 \times 10^{-6}$  m (ภาพที่ 4.1 (ก))  $10.0 \times 10^{-6}$  m (ภาพที่ 4.2 (ก)) และ  $20.0 \times 10^{-6}$  m (ภาพที่ 4.3 (ก)) เมื่อเวลาในการจำลองผ่านไปเท่ากัน พบว่า การเรียงตัวของอนุภาคมีลักษณะแตกต่างกันโดย เมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน คือห่างกัน  $5.0 \times 10^{-6}$  m อนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวเป็นແเกบ หรือโซ่ค่อนข้างชัดเจนกว่าเมื่้อนุภาคห่างกัน  $10.0 \times 10^{-6}$  m และเมื่้อนุภาคห่างกัน  $20.0 \times 10^{-6}$  m ยังไม่มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคแต่ก็มีการเคลื่อนไป ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการที่อนุภาคอยู่ห่างกันทำให้อันตรกิริยานแต่ละอนุภาคซึ่งมาจากการอ่อนตัวของอนุภาคอื่น ๆ มีค่าน้อยมาก ส่งผลให้มีการเปลี่ยนตำแหน่งน้อยมาก ซึ่งการที่อนุภาคอยู่ห่างกันหรือใกล้กันนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร หากสารมีความเข้มข้นมากอนุภาคย่อมอยู่ใกล้กัน และถ้าสารมีความเข้มข้นน้อยอนุภาคย่อมอยู่ห่างกันในสารละลาย ปริมาณเท่ากัน ดังนั้นจากการจำลองจึงพอสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของระบบสารในระบบอนุภาคแขวนลอย เป็นดัชนีหนึ่งที่บอกว่าการจัดเรียงตัวอนุภาคจะเร็วหรือช้า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การแสดงผลเชิงกราฟมีความต่อเนื่อง สวยงาม สามารถยังเกตพุติกรรมของอนุภาคช่วงโดยได้อย่างต่อเนื่อง และมีความถูกต้องตามข้อมูลจากการทดลองจริงมากยิ่งขึ้น ควรทำการจำลองดังนี้

5.2.1 ควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการประมวลที่รวดเร็ว มีหน่วยความจำสูง เนื่องจากแต่ละ step มีการคำนวณจากหลาย functions ทำให้ต้องใช้เวลาในการประมวลผลพอสมควร ซึ่งทำให้เวลาของการแสดงผลช้ากว่าเวลาจริง นั่นคือ หากทำการจำลองประมาณ  $1.0 \times 10^6$  time steps โดย  $\Delta t = 0.001$  เวลาที่ใช้ควรจะเป็น 1000 วินาที หรือ 16 นาที 40 วินาที แต่ในการจำลองต้องใช้เวลามากถึงประมาณ 4 ชั่วโมง

5.2.2 เนื่องจากแรงลัพธ์บันแต่ละอนุภาคมีค่าน้อยมาก ทำให้อนุภาคเปลี่ยนตำแหน่งน้อยมาก (อยู่ใน order  $10^{-7}$  เมตร) การแสดงผลจึงควรใช้สเกลในระดับ 1/10 ในโครเมต จึงจะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องและชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2.3 การจำลองครั้งนี้สมมติว่าอนุภาคมีมวลน้อยมาก จึงไม่นำผลของมวลมาประกอบในการคำนวณ แต่ในสภาพจริงหากอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น มวลของอนุภาคอาจมีผลต่อการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคเนื่องจากพลดของสนามโน้มถ่วง ดังนั้นในการจำลองครั้งต่อไปควรนำผลของอันตรกิริยาอันเนื่องจากมวลประกอบในการคำนวณด้วย

5.2.4 การจำลองครั้งนี้ไม่ได้คิดผลของ spin บนอนุภาคช่วงโดย ซึ่งจะส่งผลให้ทิศของโมเมนต์คู่ข้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนอนุภาคไม่อยู่ในทิศเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าทำให้เกิด phase shift ระหว่างทิศของสนามไฟฟ้ากายนอกและทิศของโมเมนต์คู่ข้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนอนุภาค เพื่อให้ระบบอนุภาคช่วงโดยที่จำลองมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติมากยิ่งขึ้น จึงควรนำผลของ spin บนอนุภาค มาประกอบในการคำนวณด้วย

5.2.5 ในการจำลองครั้งนี้ผู้วิจัยจัดให้สนามไฟฟ้าอยู่ในทิศตามแกน Z เท่านั้น ซึ่งอยู่ในทิศเดียวกับทิศของสนามโน้มถ่วง ดังนั้นเมื่อคิดผลของสนามโน้มถ่วง จึงควรจัดให้สนามไฟฟ้ามีทิศทางและความถี่ต่าง ๆ กระทำต่อระบบอนุภาคช่วงโดยเดียวกันเพื่อทดสอบว่า แนวการเรียงตัวของอนุภาคช่วงโดยขึ้นอยู่ทิศของสนามโน้มถ่วงด้วยหรือไม่

5.2.6 หากมีคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ ควรเพิ่มจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการจำลองให้มีจำนวนมากๆ เพื่อให้คล้ายกับระบบอนุภาคช่วงในธรรมชาติมากที่สุด เนื่องจากจำนวนของอนุภาคจะส่งผลต่ออันตรกิริยานแต่ละอนุภาค ซึ่งส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคช่วงโดยในระบบ

## เอกสารอ้างอิง

วงศิน เพิ่มทรัพย์ และ สิตารัตน์ ธรรมสมบติสกุล. คู่มือติดตั้งและใช้งาน Linux. กรุงเทพฯ : บริษัท โปรดิวชัน จำกัด. 318, (2542) : 17-18.

อุดม ไยเจริญ. วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์การศึกษา กรมการศึกษา. 676, (2533) : 558-564.

Brookhaven Instrument. Zeta-Potential. <http://www.brookhaven.co.uk/zeta-potential.html>. September, (2005).

Claudio Scherer. Stochastic Molecular Dynamics of Colloidal Particles. Brazilian Journal of Physics, Vol. 34, No. 2A. (2004) : 442-447.

Colloid & Complex Fluids Laboratory. Colloid particles and Complex Fluids. <http://www.mece.ualberta.ca/~subir/CCFLab/page1.html>. September, (2005).

David J. Griffiths. Introduction to Electrodynamics. Second edition, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, USA. 532, (1989) : 158-165.

Dispersion Technology, Inc. Instruments for Characterizing Concentrated Dispersion and Emulsions. <http://www.dispersion.com>. September, (2005).

Heng-Kwong Tsao. The Electrostatic Interactions Between Two Colloidal Particles of Zero Net Charge. Chinese Journal of Physics, Vol. 37, No. 5, (1999) : 488-497.

Joe D. Hoffman. NUMERICAL METHODS FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS. McGraw-Hill, Inc. USA. 825, (1993) : 240-241.

J. D. Jackson. Classical Electrodynamics. Second edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 848, (1975) : 158-161.

L. D. Landau and E. M. Lifshitz. Fluid Mechanics. Volume 6. Addison-Wesley Publishing company, Inc. Massachusetts, USA. 536, (1987) : 63-68.

Masahiko Abe, et al. Control of Particle Alignment in Water by an Alternating Electric Field. Langmuir, Vol. 20, No. 17, (2004) : 7021-7026.

Michael Pycraft Hughes. AC Electrokinetics : Applications for Nanotechnology. <http://www.bath.ac.uk>. September, (2005).

M. B. McBride and P. Baveye. Particle interactions in Colloidal systems. Soil Sci. Soc. Am. J, Vol. 66, (2002) : 1207-1217.

Subir Bhattacharjee, Menachem Elimelech, and Michal Borkovec. DLVO Interaction between Colloidal Particles: Beyond Derjaguin's Approximation. CCACAA, Vol. 71, No. 4, (1998) : 883-903.

Tuberose Inc. Colloidal System. [http://tuberose.com/colloidal\\_system.html](http://tuberose.com/colloidal_system.html). September, (2005).

W. T. Scott. The Physics of Electricity and Magnetism. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 635, (1959) : 95-102.

X.-B. Wang, *et al.* PARTICLE DIPOLE-DIPOLE INTERACTION IN AC ELECTRIC FIELDS. IEEE, (1994) : 774-775.

Yue Hu. Simulations of the motion of Colloidal particles in Alternating Electric fields. Computers in Physics, Vol. 8, No. 5, (1994) : 524-529.

## **ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก

วิธีของออยเลอร์ (Euler's Method)

## วิธีของอยเลอร์ (Euler's Method)

จากสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขเริ่มต้น  $y = y_0$  เมื่อ  $x = x_0$  เราจะ

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

ดังนั้น ส่วนเพิ่ม  $\Delta y$  สามารถคำนวณจากสมการ

$$\begin{aligned}\Delta y &= \frac{dy}{dx} \Delta x && \text{เมื่อ } \Delta x \text{ มีค่าน้อยๆ} \\ &= f(x, y) \Delta x \\ &= hf(x, y) && \text{เมื่อ } \Delta x = h\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\int_{y_0}^{y_1} dy = \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) dx$$

หรือ

$$y_1 = y_0 + \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) dx$$

ถ้าแทนฟังก์ชัน  $f(x, y)$  ด้วยค่าประมาณ  $f(x_0, y_0)$  แล้ว จะได้

$$\begin{aligned}y_1 &= y_0 + \int_{x_0}^{x_1} f(x_0, y_0) dx \\ &= y_0 + (x_1 - x_0) f(x_0, y_0) \quad \text{ที่ } x = x_1\end{aligned}$$

หรือ

$$y_1 = y_0 + hf(x_0, y_0) + O \quad \text{ที่ } x = x_1$$

เมื่อ  $O$  เป็นความผิดพลาดเนื่องจากการประมาณ และเรียกว่าความผิดพลาดจากการตัดเทอมต่อไป จะได้

$$y_2 = y_1 + hf(x_1, y_1)$$

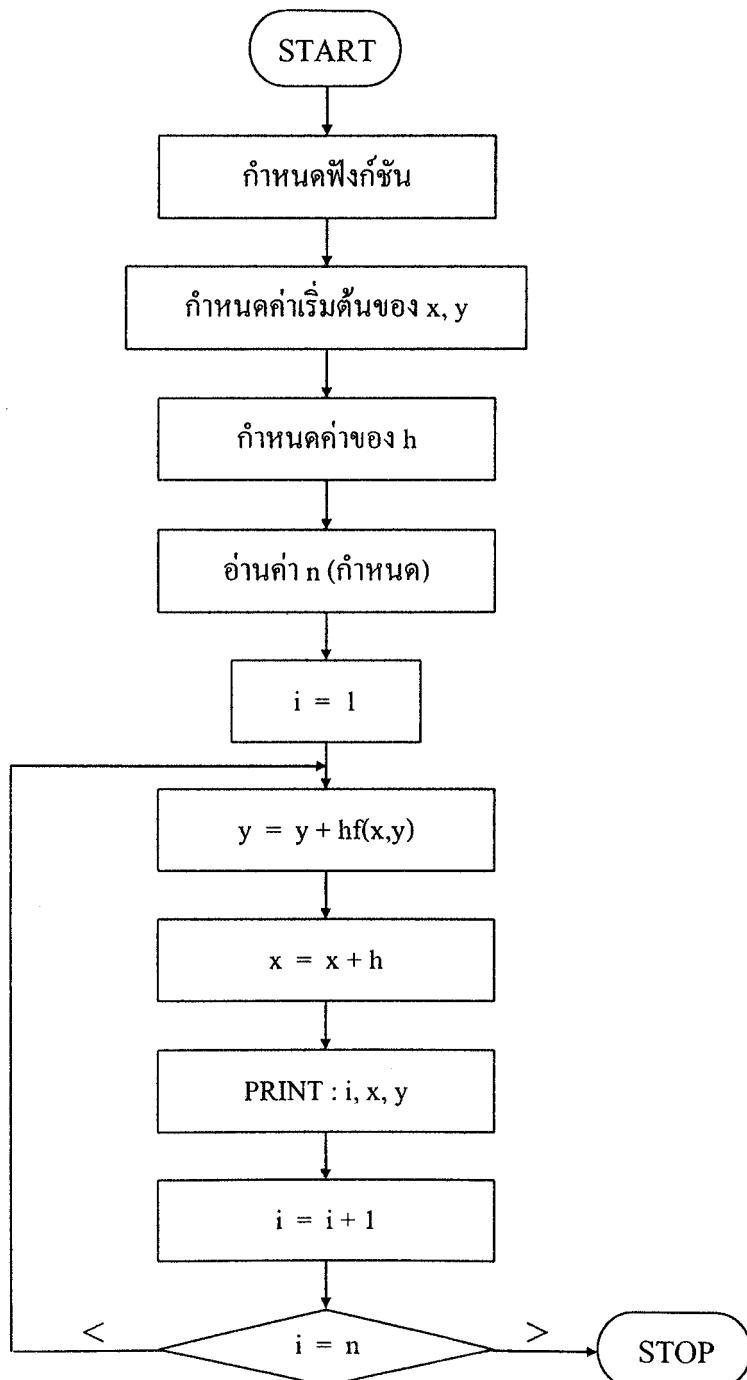
$$y_3 = y_2 + hf(x_2, y_2)$$

$\vdots$

$$y_{n+a} = y_n + hf(x_n, y_n); \quad n=0, 1, 2, \dots$$

จะนั้น การเริ่มต้นจาก  $x_0$  เมื่อ  $y = y_0$  ย่อมทำให้เราสามารถสร้างตารางค่าของ  $y$  เมื่อกำหนดขั้นของ  $x$

ขั้นตอนการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ตามวิธีของ Euler มีลำดับดังนี้



ภาพที่ ก1 แสดงลำดับขั้นตอนการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ตามวิธีของ Euler

ภาคผนวก ๔

Xgraphics Library

## ๑.1 concepts of Xgraphics

library Xgraphics เป็น library ซึ่งใช้ในการเขียน X-Windows ภายในโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยไม่ต้องใช้โปรแกรมประยุกต์อื่น จึงทำให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรม โดยมีรายละเอียดดังนี้

### Drawing areas : Worlds

องค์ประกอบพื้นฐานหนึ่งของ Xgraphics คือ การกำหนดพื้นที่การทำงานภายในหน้าต่าง เรียกว่า World ซึ่งกำหนดได้ด้วยตำแหน่งในระบบพิกัด全局 โดยทั่วไปสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ตามคุณสมบัติของการเปลี่ยนขนาดของ Window คือ scaling World คือ World ที่เปลี่ยนขนาดตามการเปลี่ยนขนาดของ Window และ fix World คือ World ที่ขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนตามการเปลี่ยนขนาดของ Window

### The mouse : Buttons

นอกจากนี้ส่วนประกอบที่ออกแบบไว้สำหรับให้ผู้ใช้ควบคุมหรือติดต่อกับโปรแกรม คือ Button ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งการใช้ mouse และ keyboard

### Colors :

การใช้สีเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถสำหรับ X-Windows เมื่อจากเมื่อมีการรันโปรแกรมหลาย ๆ โปรแกรมบน server ตัวเดียวกัน จำนวนสีในความจุของ server จะไม่เพียงพอต่อการใช้งานของแต่ละโปรแกรม ดังนั้น เมื่อรันโปรแกรมหนึ่งซึ่งแสดงผลเชิงกราฟพิกใช้สีไปแล้ว โปรแกรมอื่น ๆ ที่รันภายหลังจะเป็น gray scales สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งดังนี้ (a) จำกัดจำนวนโปรแกรมที่ใช้สี (b) พยายามใช้สีที่เหมือนกัน และ (c) ใช้ colormap ส่วนตัว วิธีนี้จะทำให้สีของหน้าต่างอื่น ๆ ผิดไปจากความเป็นจริง สำหรับ X-graphics เลือกใช้วิธี (a) และ (b) โดยมีรายการสีไว้แล้วและพยายามจัดสรรสีเหล่านั้นให้แต่ละหน้าต่าง ถ้าสีที่ต้องการไม่อยู่แล้วใน colormap ของ server จะเรียกใช้ใน server ก่อน ถ้า colormap ของ server ไม่มีสีที่ต้องการ แต่มีเซลล์สีว่าง (free color cell) เซลล์สีใหม่จะถูกจัดสรรจากเซลล์สีนี้ แต่ถ้าไม่มีเซลล์สีว่าง X-graphics จะพยายามค้นหาสีที่คล้ายกันที่สุด ถ้าไม่สำเร็จจะหาสีตัดไปจากรายการที่มีอยู่ไปเรื่อย ๆ จนสามารถแสดงผลได้

### Structure of a program :

โครงสร้างของโปรแกรม X-graphics เริ่มจากการเปลี่ยนเข้าสู่หน้าต่าง X-server โดยใช้โปรแกรมย่อ (routine) InitX() จากนั้นจะกำหนดหน้าต่าง (Windows) พื้นที่ทำงาน (Worlds) และปุ่มควบคุม (Buttons) ตามลำดับ

## 8.2 Xgraphics functions

void Initx()

เชื่อมต่อ กับ X-server, X data structures เช่น ทรัพยากรหรือสภาวะที่สนับสนุนการแสดงผลเชิงกราฟฟิก (graphic context) และลิ้งค์น ๆ จะเริ่มต้นขึ้นด้วยคำเริ่มต้นที่กำหนด

void Exitx()

ปิดหน้าต่างทุกหน้าต่างที่เปิดอยู่ หน่วยความจำที่ถูกใช้โดย X หรือ X-graphics จะถูกลบ การเชื่อมต่อ กับ X-server จะถูกปิด

window CreateWindow(int width, int height, char\* name)

สร้างหน้าต่างกว้าง width สูง height และชื่อ name โดยตำแหน่งภายในหน้าต่างจะสัมพันธ์กับมุมบนซ้ายของหน้าต่างเสมอ ซึ่งจะยังไม่แสดงผลในทันทีจนกว่าจะถูกเรียกโดยฟังก์ชัน ShowWindow

void DestroyWindow(Window win)

หน้าต่าง win จะถูกปิด แต่ก่อนที่จะปิดหน้าต่าง ทุก World จะถูกปิด พร้อม ๆ กับลบหน่วยความจำที่ใช้อยู่ทั้งหมด

void ShowWindow(window win)

หน้าต่าง win จะถูกแสดงบนหน้าจอ

void HideWindow(window win)

หน้าต่าง win จะถูกซ่อนจากหน้าจอ แต่โครงสร้างข้อมูลไม่ได้ถูกลบจากหน่วยความจำ

void ClearWindow(window win)

หน้าต่าง win จะถูกระบายน้ำด้วยสีพื้น

World CrateWorld(window win, int px, int py, int pwidth, int pheight, double wx1, double wy1, double wx2, double wy2, int scalable, int gravity)

สร้างพื้นที่ทำงานในหน้าต่าง win โดยมุมบนซ้ายอยู่ที่ px, py กว้าง width สูง height h ในหน่วย pixels ตำแหน่งประกอบที่มุมบนซ้าย และมุมล่างขวาเป็น (wx1, wy1) และ (wx2, wy2) ตามลำดับ scalable จะกำหนดขนาดของพื้นที่เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของหน้าต่าง ถ้าเป็น 0 หมายถึง

ไม่มีการเปลี่ยนขนาดพื้นที่การทำงาน gravity จะกำหนดค่ามุ่งหรือของของพื้นที่การทำงานให้แนบกับขอบของหน้าต่างตามด้านที่กำหนด

`void DestroyWorld(World world)`

ลบพื้นที่การทำงานออกจากหน่วยความจำ

`void ClearWorld(World world)`

พื้นที่การทำงานจะถูกระยะห่างด้วยสีพื้น

`void RescaleWorld(World world, double nx1, double ny1, double nx2, double ny2)`

เปลี่ยนตำแหน่งปรากฎของพื้นที่ทำงาน โดยให้มุนบนซ้ายและมุนล่างขวาเป็น (nx1, ny1)

และ (nx2, ny2) ตามลำดับ

`void InitButtons(Window win, const char* buttonstring, int width)`

สร้างปุ่มควบคุมและป้ายที่ด้านขวาของหน้าต่างตามจำนวนและชื่อที่กำหนด เช่น "t, commands, b, exit, e, b, menu, m, b, clear, c" หมายถึง สร้างป้าย commands ปุ่ม exit เมื่อกด e ปุ่ม menu เมื่อกด m และ ปุ่ม clear เมื่อกด c หรือใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม

`int GetEvent(XEvent* event, int waitflag)`

อ่านเหตุการณ์ต่อไปจากเหตุการณ์ที่กำหนดไว้ในคิวของโปรแกรมและเขียนข้อมูลของแต่ละเหตุการณ์

`char ExtractChar(XEvent event)`

คืนค่ารหัส ASCII เมื่อกดคีย์ตามที่กำหนดใน event

`void ClearArea(Window win, int x, int y, int width, int height)`

ลบพื้นที่ที่กำหนด

`void DrawPoint(Window win, int x, int y, int c)`

วาดจุดที่พิกัด (x, y) ด้วยสี c ในหน้าต่าง

`void DrawPoints(Window win, Xpoint *points, int NofPoints, int c)`

วาดจุดจำนวน NofPoints จุด ที่ผ่านในโครงสร้างข้อมูล Xpoint \*points ด้วยสี c ในหน้าต่าง

`void DrawLine(Window win, int x1, int y1, int x2, int y2, int c)`

วาดรูปเส้นจาก  $(x_1, y_1)$  ไป  $(x_2, y_2)$

`void DrawLines(Window win, Xpoint *points, int NofPoints, int c)`

วาดรูปหลายเหลี่ยมเปิด โดยกำหนดให้ผ่านจุดหลาย ๆ จุด

`void DrawCircle(Window win, int x, int y, int r, int c)`

วาดวงกลม รัศมี  $r$  จุดศูนย์กลางอยู่ที่  $(x, y)$

`void FillCircle(Window win, int x, int y, int r, int c)`

วาดวงกลมทึบ รัศมี  $r$  จุดศูนย์กลางอยู่ที่  $(x, y)$  ด้วยสี  $c$

`void DrawString(Window win, int x, int y, const char *text, int c)`

เขียนข้อความ  $text$  ที่ตำแหน่ง  $(x, y)$  ด้วยสี  $c$

`void DrawRectangle(Window win, int x1, int y1, int x2, int y2, int c)`

วาดรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีมุมบนซ้าย  $(x_1, y_1)$  และมุมล่างขวา  $(x_2, y_2)$

`void FillRectangle(Window win, int x1, int y1, int x2, int y2, int c)`

วาดรูปสี่เหลี่ยมทึบซึ่งมีมุมบนซ้าย  $(x_1, y_1)$  และมุมล่างขวา  $(x_2, y_2)$

`void DrawPoly(Window win, Xpoint *points, int NofPoints, int c)`

วาดรูปหลายเหลี่ยมปิด

`void FillPoly(Window win, Xpoint *points, int NofPoints, int c, int cfill)`

วาดรูปหลายเหลี่ยมด้วยสี  $c$  และระบายด้วยสี  $cfill$

สำหรับการวาดรูปหรือเขียนข้อความใน World นี้ syntax เช่นเดียวกับการวาดรูปหรือเขียนข้อความใน Window เพียงแต่มี W นำหน้า เปลี่ยน Window เป็น World และ ตำแหน่งเป็นตัวเลขชนิด double floating point ดังนี้

`void WDrawPoint(World world, double x, double, int c)`

`void WDrawPoints(World world, Xpoint *points, int NofPoints, int c)`

`void WDrawLine(World world, double x1, double y1, double x2, double y2, int c)`

`void WDrawLines(World world, Xpoint *points, int NofPoints, int c)`

```
void WDrawCircle(World world, double x, double y, double r, int c)
void WFillCircle(World world, double x, double y, double r, int c)
void WDrawString(World world, double x, double y, const char *text, int c)
void WDrawRectangle(World world, double x1, double y1, double x2, double y2, int c)
void WFillRectangle(World world, double x1, double y1, double x2, double y2, int c)
void WDrawPoly(World world, Xpoint *points, int NofPoints, int c)
void WDrawPoly(World world, Xpoint *points, int NofPoints, int c, int cfill)
```

ภาคนวัก ค

SOURCE CODE ของโปรแกรม

## SOURCE CODE ของโปรแกรม

```

/*****colloidal.c*****
/*
 *      To simulate the motion of colloidal particles in Alternating Electric fields.
 */
*****colloidal.c*****



#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include "Xgraphics.h"

/* ----- constants are use in program ----- */
#define N 50
#define factor 2.e-6/3.          // to scale point to metres
#define pi 3.14159265358979
#define E0 7500.                // rms external field (Volt/metre)
#define freq 1000.               // Hertz
#define a 2.25                  // radius of particle (x 2/3 micrometres)
#define dt 0.001                 // iteration time step (second)
#define time_step 1500000

/* ----- Physical constants are use in program ----- */
#define ep_0 8.85418717e-12 // permittivity of Vacuum (Farad/m)
#define ep_m 78.4            // Water at 25 celcius degree
#define ep_p 6.5              // average relative permittivity of mica
#define eta 0.001002         // viscosity of water at 20 C degree (Ns/m^2)

```

```

/* ----- Declare the functions are used in program ----- */
void initpos();
void event();
void cal_r();
void cal_phi();
double cal_mu_0();
void cal_E1();
void cal_mu();
void cal_F();
void update_p();
void clock();

/* -----Declare the variables are used in program----- */
typedef struct point{
    double x;
    double z;
} pnt;
pnt p[N], p_new[N];
int i, j, k;
int stop = 1;
double r[N][N], phi[N][N];
double beta = 4.*pi*ep_0*ep_m*(a*factor)*(a*factor)*(a*factor)
            *(ep_p-ep_m)/(ep_p+2.*ep_m);
double mu_0, mu[N];
double E1_x[N][N], E1_z[N][N];
double Eit_x[N], Eit_z[N];
double E[N], Ex[N], Ez[N];
double Find_r[N][N], Find_phi[N][N], Find[N][N];
double Frep_r[N][N];
double Fel[N][N], Fel_x[N][N], Fel_z[N][N];

```

```

double Fx[N], Fz[N];
double drx[N], drz[N];
double dpx[N], dpz[N];
double time;
char str[100];

```

---

definition of Variables

---

p        is a position of a particle.  
 p\_new    is a new position of a particle at dt.  
 r        is a displacement of 2 points in space.  
 phi      is an angle between z axis and r  
 mu\_0     is an induced dipole moment due to external field E0.  
 E1       is an induced electric field.  
 Eit      is an total induced electric field.  
 E        is a total field (sum of E0 and E1).  
 Find\_r    is a radial force due to an induce dipole moment.  
 Find\_phi is a tangential force due to an induce dipole moment.  
 Find      is the total force due to an induce dipole moment.  
 Frep\_r    is a radial repulsive force due to DLVO theory.  
 Fel       is the total electrodynamic force (sum of Find and Frep).  
 F        is the total force on i particle from all j particles

---



---

Window mywindow;

World myworld, printworld;

XEvent myevent;



```

printworld = CreateWorld(mywindow,
                        665,150,800,450, 0,0,135,300, 0, 0);
InitButtons(mywindow,"t,Commands:,b,exit,e,b,start/stop,s",100);

ShowWindow(mywindow);

while(1){

    initpos(&p);
    event();
    for (k=0;k<=time_step;k++){
        cal_r(&p);
        cal_phi(&p);
        mu_0 = cal_mu_0()*cos(k*pi);
        cal_E1();
        cal_F();
        time += dt;
        clock(time);
        update_p(&p);
    }
}

ExitX();      /* clean up memory */
return 0;
}

/* ===== End of Main program ===== */

void initpos(pnt *p)
{
    int i;
}

```

```

ClearWorld(myworld);

WDrawLine(myworld, 0, 0, 0, 250, 1);
WDrawLine(myworld, 0, 250, 300, 250, 1);
WDrawLine(myworld, 0, 0, 300, 0, 1);
WDrawLine(myworld, 300, 0, 300, 250, 1);
WDrawLine(myworld, 150, 0, 150, 5, 1);
WDrawLine(myworld, 0, 125, 5, 125, 1);
WDrawLine(myworld, 150, 250, 150, 245, 1);
WDrawLine(myworld, 300, 125, 295, 125, 1);
for (i=0;i<N;i++){
    WFillCircle(myworld, p[i].x, p[i].z, a, 1);
}

WDrawString(printworld,0,60,"Angular Frequecy ",1);
sprintf(str," = %d Hz",freq);
WDrawString(printworld,2,80,str,2);

WDrawString(printworld,0,110,"Radius of particle ",1);
sprintf(str," = %.2lf micron",a*2./3.);

WDrawString(printworld,2,130,str,2);
WDrawString(printworld,0,160,"time:",1);
WDrawString(printworld,0,180," 00: 00: 00: 000 hr.",4);
}

void event()
{
    char kbdin;

    while(GetEvent(&myevent,stop)){
        switch (myevent.type)
        case KeyPress:{kbdin = ExtractChar(myevent);

            switch(kbdin){
                case 'e': ExitX();exit(1);break;
            }
        }
    }
}

```

```

        case 's': stop = 1-stop; break;
        default: break;
    } /* switch */
} /* case */
} /* while */
}

void cal_r(pnt *p)
{
/* Calculate the displacement between externalelectric field
and displacement */

    double pz[N];

    for (i=0; i<N; i++){
        pz[i] = 250.-p[i].z;
    }

    for (i=0; i<N; i++){
        for (j=0; j<N; j++){
            if (i!=j){
                r[i][j] = (sqrt((p[j].x-p[i].x)*(p[j].x-p[i].x)+
                    (pz[j]-pz[i])*(pz[j]-pz[i]))) * factor;
            }
        }
    }
}

```

```

void cal_phi(pnt *p)
{
/* Calculate the angle between external electric field
and displacement */

    double pz[N];

    for (i=0; i<N; i++){
        pz[i] = 250.-p[i].z;
    }

    for (i=0; i<N; i++){
        for (j=0; j<N; j++){
            if (i!=j){
                phi[i][j] = atan((p[j].x-p[i].x)/(pz[j]-pz[i]));
            }
        }
    }
}

double cal_mu_0()
{
/* Calculate the electric dipole moment due to the external field*/

    double di_m;

    di_m = beta*E0;
    return di_m;
}

```

```

void cal_E1()
{
/* Calculate the radis induce electric field */

double G[N][N];

for (i=0; i<N; i++){
    for (j=0; j<N; j++){
        if (i!=j){
            G[i][j] = 1./(4.*pi*ep_0*ep_m*r[i][j]*r[i][j]*r[i][j]);
        }
    }
}

for (i=0; i<N; i++){
    for (j=0; j<N; j++){
        if (i!=j){
            E1_x[i][j] = G[i][j]*3.*sin(phi[i][j])*cos(phi[i][j])*mu_0;
            E1_z[i][j] = G[i][j]*(3.*cos(phi[i][j])*cos(phi[i][j]-1.)*mu_0;
        }
    }
}

for (i=0;i<N;i++){
    Eit_x[i] = E1_x[0][i]+E1_x[1][i]+E1_x[2][i]+E1_x[3][i]+E1_x[4][i]+
    E1_x[5][i]+E1_x[6][i]+E1_x[7][i]+E1_x[8][i]+E1_x[9][i]+
    E1_x[10][i]+E1_x[11][i]+E1_x[12][i]+E1_x[13][i]+E1_x[14][i]+
    E1_x[15][i]+E1_x[16][i]+E1_x[17][i]+E1_x[18][i]+E1_x[19][i]+
    E1_x[20][i]+E1_x[21][i]+E1_x[22][i]+E1_x[23][i]+E1_x[24][i]+
    E1_x[25][i]+E1_x[26][i]+E1_x[27][i]+E1_x[28][i]+E1_x[29][i]+
    E1_x[30][i]+E1_x[31][i]+E1_x[32][i]+E1_x[33][i]+E1_x[34][i]+
}

```

```

E1_x[35][i]+E1_x[36][i]+E1_x[37][i]+E1_x[38][i]+E1_x[39][i]+
E1_x[40][i]+E1_x[41][i]+E1_x[42][i]+E1_x[43][i]+E1_x[44][i]+
E1_x[45][i]+E1_x[46][i]+E1_x[47][i]+E1_x[48][i]+E1_x[49][i];
Eit_z[i] = E1_z[0][i]+E1_z[1][i]+E1_z[2][i]+E1_z[3][i]+E1_z[4][i]+
E1_z[5][i]+E1_z[6][i]+E1_z[7][i]+E1_z[8][i]+E1_z[9][i]+
E1_z[10][i]+E1_z[11][i]+E1_z[12][i]+E1_z[13][i]+E1_z[14][i]+
E1_z[15][i]+E1_z[16][i]+E1_z[17][i]+E1_z[18][i]+E1_z[19][i]+
E1_z[20][i]+E1_z[21][i]+E1_z[22][i]+E1_z[23][i]+E1_z[24][i]+
E1_z[25][i]+E1_z[26][i]+E1_z[27][i]+E1_z[28][i]+E1_z[29][i]+
E1_z[30][i]+E1_z[31][i]+E1_z[32][i]+E1_z[33][i]+E1_z[34][i]+
E1_z[35][i]+E1_z[36][i]+E1_z[37][i]+E1_z[38][i]+E1_z[39][i]+
E1_z[40][i]+E1_z[41][i]+E1_z[42][i]+E1_z[43][i]+E1_z[44][i]+
E1_z[45][i]+E1_z[46][i]+E1_z[47][i]+E1_z[48][i]+E1_z[49][i];
}

for (i=0;i<N;i++){
    Ex[i] = Eit_x[i];
    Ez[i] = E0+Eit_z[i];
    E[i] = sqrt(Ex[i]*Ex[i]+Ez[i]*Ez[i]);
}
}

void cal_mu()
{
/* Calculate the electric dipole moment due to the external field*/

    for (i=0;i<N;i++){
        mu[i] = beta*E[i];
    }
}

```

```

void cal_F()
{
/* Calculate the x and y component of force on a particle */
for (i=0; i<N; i++){
    for (j=0; j<N; j++){
        if (i!=j){
            Find_r[i][j] = -(3.*mu[i]*mu[i]/(4.*pi*ep_0*ep_m))*(
                ((3.*cos(phi[i][j])*cos(phi[i][j])-1.)/
                (r[i][j]*r[i][j]*r[i][j]*r[i][j]));
            Find_phi[i][j] = -(mu[i]*mu[i]/(2.*pi*ep_0*ep_m))*(
                ((3.*sin(phi[i][j])*cos(phi[i][j]))/
                (r[i][j]*r[i][j]*r[i][j]*r[i][j]));
            Find[i][j] = -sqrt(Find_r[i][j]*Find_r[i][j]+
                Find_phi[i][j]*Find_phi[i][j]);
        }
    }
}

double K[N][N];

for (i=0;i<N;i++){
    for (j=0;j<N;j++){
        if(i!=j){
            K[i][j] = pow(8.*pi*ep_0*ep_m/(3.*mu[i]*mu[i]),1./4.)*
                r[i][j]*1.e-2;
        }
    }
}

```

```

for (i=0; i<N; i++){
    for (j=0; j<N; j++){
        if (i!=j){
            Frep_r[i][j] = 200.*exp(-(K[i][j]-1.4667425)/.75);
        }
    }
}

for (i=0;i<N;i++){
    for (j=0;j<N;j++){
        if (i!=j){
            Fel[i][j] = Find[i][j]+Frep_r[i][j];
            Fel_x[i][j] = Fel[i][j]*sin(phi[i][j]);
            Fel_z[i][j] = Fel[i][j]*cos(phi[i][j]);
        }
    }
}

for (i=0;i<N;i++){
    Fx[i] = Fel_x[0][i]+Fel_x[1][i]+Fel_x[2][i];
    Fz[i] = Fel_z[0][i]+Fel_z[1][i]+Fel_z[2][i];
}
}

void update_p(pnt *p)
{
/* update the new positions of each particles at time step */
    double R = a*factor;
}

```

```

for (i=0;i<N;i++){
    drx[i] = Fx[i]*dt/(6.*pi*eta*R);
    drz[i] = Fz[i]*dt/(6.*pi*eta*R);
}

double pz[N], pz_new[N];

for (i=0;i<N;i++){
    dpx[i] = drx[i]/factor;
    dpz[i] = drz[i]/factor;
}

ClearWorld(myworld);

for (i=0;i<N;i++){
    pz[i] = 250.-p[i].z;
    p_new[i].x = p[i].x+dpx[i];
    pz_new[i] = pz[i]+dpz[i];
    p_new[i].z = 250.-pz_new[i];
    p[i] = p_new[i];
    WFillCircle(myworld, p[i].x, p[i].z, a, 4);
}

void clock(double tt)
{
    int hh, mm, ss, ssss;

    hh = tt/3600.;
    mm = (tt-(double)hh*3600.)/60.;
    ss = tt-(double)hh*3600.-(double)mm*60.;
```

```
ssss = (tt-(double)hh*3600.-(double)mm*60.  
-(double)ss)*100.;  
  
sprintf(str," %d ",hh);  
WDrawString(printworld,0,180,str,4);  
sprintf(str,: %d ",mm);  
WDrawString(printworld,3,180,str,4);  
sprintf(str,: %d ",ss);  
WDrawString(printworld,8,180,str,4);  
sprintf(str,: %d",ssss);  
WDrawString(printworld,13,180,str,4);  
}
```

## ประวัติผู้วิจัย

<b>ชื่อ</b> <b>ประวัติการศึกษา</b>	<b>นายจันทร์เพ็ง อังกอร์เจ</b> <b>จบการศึกษา ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ. พลิกส์)</b> <b>จากสถาบันราชภัฏนรินทร์ ในปี พ.ศ. 2541</b> <b>จบการศึกษา ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.ม. พลิกส์) จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในปี พ.ศ. 2549</b>
<b>ประวัติการวิจัย, สัมมนา</b>	<b>ได้ร่วมประชุมและตีพิมพ์บทความ เรื่อง การแสดงผลการจำลอง ณ เวลาจริงของการศึกษาพุตติกรรมของอนุภาคแขวนลอยในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการใช้ Xgraphics Library (A REAL-TIME VISUALIZATION OF BEHAVIOR OF COLLOIDAL PARTICLES IN AN AC ELECTRIC FIELD BY USING XGRAPHICS LIBRARY.) ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 (วทท. 32) ในระหว่างวันที่ 10–12 ตุลาคม 2549 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร</b> <b>รับราชการครู ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 โรงเรียนเนมราฐพิทยาคม เมื่อ ปี พ.ศ. 2542</b>
<b>ประวัติการทำงาน</b>	<b>รับราชการครู ตำแหน่ง ครู (คศ. 1) โรงเรียนเนมราฐพิทยาคม อำเภอเนมราฐ จังหวัดอุบลราชธานี รหัสไปรษณีย์ 34170 โทรศัพท์ 08-4549-1244, โทรสาร 08-4549-1783, โทรศัพท์มือถือ 08-7255-3799, Email : chanp2010@yahoo.co.th</b>
<b>ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน</b>	