

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis theory)

ไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (คำย่อ DEP) อ้างถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกทำให้เกิดขั้วทางไฟฟ้าในของเหลว ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า จากวิธีไดโพลโมเมนต์ (dipole moment method) ค่าแรงเฉลี่ยของ DEP บนอนุภาคทรงกลมด้วยรัศมี  $a$  คือ [22]

$$\langle \vec{F}_{DEP} \rangle = 2\pi\epsilon_m a^3 \operatorname{Re}[f_{CM}(\omega)] \nabla |\vec{E}_{rms}|^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $\langle \rangle$  แทนเครื่องหมายค่าเฉลี่ย,  $\epsilon_m$  คือความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าของของเหลว

$f_{CM}(\omega) = (\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_p + 2\epsilon_m)$  คือ complex Clausius-Mossotti (CM) โดย  $\operatorname{Re}[f_{CM}(\omega)]$  คือจำนวนจริงของ CM ซึ่งเริ่ม -0.5 ถึง +1.  $\epsilon_p$  และ  $\epsilon_m$  คือ จำนวนเชิงซ้อนของความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าของอนุภาคและของเหลว ตามลำดับ (โดย  $\underline{\epsilon} = \epsilon - i\sigma/\omega$  จำนวนเชิงซ้อนของความซาบซึมโดยมี  $\epsilon$  และ  $\sigma$  เป็นค่าจำนวนจริงของความซาบซึมและความสามารถในการนำ,  $i = \sqrt{-1}$ , และ  $\omega = 2\pi f$ ) เมื่ออนุภาคมีสามารเกิดขั้วได้มากกว่าของเหลวที่อยู่รอบๆ ค่า  $\operatorname{Re}[f_{CM}(\omega)] > 0$  อนุภาคจะรับแรงที่เป็นบวก (positive DEP, pDEP) ในทางกลับกัน ถ้าอนุภาคมีสามารเกิดขั้วได้น้อยกว่าของเหลวที่อยู่รอบๆ ค่า  $\operatorname{Re}[f_{CM}(\omega)] < 0$  อนุภาคจะรับแรงที่เป็นลบ (negative DEP, nDEP) อนุภาคที่ได้รับแรง pDEP จะเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความแรงของสนามไฟฟ้าสูง และอนุภาคที่ได้รับแรง nDEP จะเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณความแรงของสนามไฟฟ้าน่า

ค่าของ CM factor สามารถเปลี่ยนโดยเลือกค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าให้เหมาะสม เมื่อความถี่สูงมากๆถูกใช้,

$$\operatorname{Re}[f_{CM}(\omega \rightarrow \infty)] \approx \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad (2a)$$

ในทางกลับกันที่ความถี่สนามไฟฟ้าน่า เช่น 0 (DC) ถึง 10 kHz

$$\operatorname{Re}[f_{CM}(\omega \rightarrow 0)] \approx \frac{\sigma_p - \sigma_m}{\sigma_p + 2\sigma_m} \quad (2b)$$

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตร ความสามารถในการนำไฟฟ้า  $\sigma_p$  เปลี่ยนไปและเขียนให้อยู่ในรูปของการรวมกันของ ความสามารถในการนำไฟฟ้าภายในตัวของอนุภาค ( $\sigma_{p,bulk}$ ) และ ที่ผิวของอนุภาค ( $2Ks/a$ ) ตามนี้

$$\sigma_p = \sigma_{p,bulk} + \frac{2Ks}{a} \quad (3)$$

เมื่อ  $Ks$  คือ ค่าการนำทางไฟฟ้าบนผิวอนุภาคเริ่ม 0.2 ถึง 2.1 nS [23, 24] และ  $\sigma_{p,bulk}$  มีค่าเกือบเป็นศูนย์สำหรับอนุภาคประเภทโพลีสไตรีน (polystyrene dielectric particles)

## 2.2 ทฤษฎีการไหลของของเหลว (Fluid dynamics)

การเคลื่อนที่ของของเหลวในช่องแคบระดับไมโครควบคุมโดยสมการสโตกส์ (Stokes' equation)

เมื่อ  $Re \ll 1$  โดยแสดงได้ดังนี้

$$-\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{u} = 0 \quad (5)$$

โดย  $p$  คือ ความดันเฉพาะแห่งในช่องแคบระดับไมโคร,  $\eta$  คือความหนืด และ  $\vec{u}$  คือเวกเตอร์ความเร็วของของเหลวสามารถนำไปพล็อตเส้นสายธาร (streamlines) เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาค

## 2.3 ทฤษฎีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (Electric field distribution)

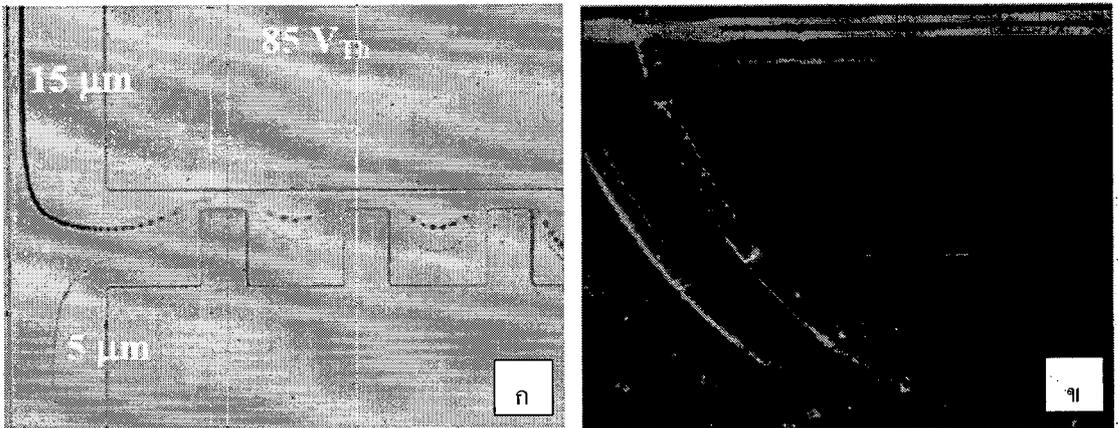
สนามไฟฟ้าที่กระจายตัวในของเหลวที่อยู่ในช่องแคบระดับไมโครมีพฤติกรรมตามสมการลาปลาซ (Laplace's equation) ดังนี้

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (6)$$

โดย  $\phi$  คือความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V) และ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าคือ  $\vec{E} = -\nabla \phi$  (V/m)

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ด้วยหลักการด้านบนจึงทำให้เกิดเทคนิคหลากหลายในการออกแบบอุปกรณ์ iDEP หนึ่งในงานที่ใหม่คือการนำเอาทั้งสนามไฟฟ้าแบบตรงและสลับมาใช้รวมกันในการเพิ่มจำนวนอนุภาค (particle concentration) โดยส่วนใหญ่ งานที่ได้นำเสนอจนถึงปัจจุบันยังเน้นไปที่การแยกอนุภาคแบบสองขนาดและชนิด [25-28] ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 2.1ก เป็นการแยกอนุภาคสองขนาด A) 5  $\mu\text{m}$  และ 15  $\mu\text{m}$  ด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงใน Modified H-filter [26] และ ภาพที่ 2.1ข) เป็นการแยกอนุภาคสองขนาด 2  $\mu\text{m}$  และ 3  $\mu\text{m}$  ด้วยสนามไฟฟ้ากระแสผสมระหว่าง DC และ AC [25] อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ามีงานวิจัยบางส่วนใช้อุปกรณ์ DEP แบบใช้อิเลคโตรดนำไปแยกอนุภาคมากกว่า 2 ชนิด [29] การแยกอนุภาคหลายชนิดและขนาดยังไม่ได้มีการศึกษาในอุปกรณ์ iDEP



ภาพที่ 2.1 การแยกอนุภาคสองขนาด ก) 5  $\mu\text{m}$  และ 15  $\mu\text{m}$  ด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงใน Modified H-filter [26] และ ข) 2  $\mu\text{m}$  และ 3  $\mu\text{m}$  ด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับระหว่าง DC และ AC [25]

โครงสร้างของอุปกรณ์ที่เป็นที่นิยมใช้สำหรับแยกสารหรืออนุภาคสองชนิดหรือขนาดคือ รูปร่างเอช (H) และได้รู้จักอย่างแพร่หลายว่าตัวกรองรูปเอช (H-filter) [30] แต่อุปกรณ์นี้ทำงานไม่ดีเมื่ออนุภาคใหญ่ในขนาดไมโคร เช่นเม็ดเลือด เนื่องจากค่าการแพร่ของอนุภาคขนาดไมโครต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการนำเสนอเอาแรง DC-DEP มาใช้ในการแยกอนุภาค โดยใช้สนามไฟฟ้าแบบตรง (DC electric field) ในอุปกรณ์ที่เรียกว่า Modified H-filter แต่ยังเป็นการแยกอนุภาคสองขนาด เท่านั้น [26] มากกว่านั้นมาตรฐานการออกแบบบล็อก (design guidelines) ยังไม่ถูกศึกษา