

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวขวางการไหลและสนามพลาสมา โดยเริ่มจากการนิยามแนวคิดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง คือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวขวางการไหล ส่วนที่สองคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลาสมา ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์หรือการปล่อยประจุไฟฟ้าในก๊าซ สมการควบคุมในรูปทั่วไป และกลไกการเกิดพลาสมาชนิดไม่มีความร้อน (Non-thermal plasma) และการเกิดการแตกตัวของอากาศเป็นไอออน รวมถึงกลไกการทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้า

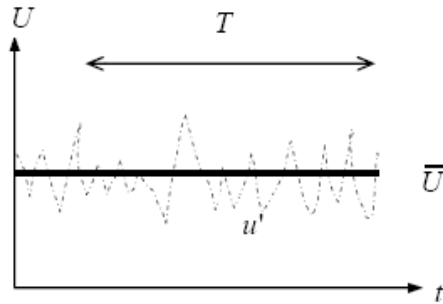
2.1 การศึกษาการไหล

การศึกษาการไหลของของไหลในอดีต ด้วยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อที่จะเข้าใจปรากฏการณ์การไหล จำเป็นต้องพึ่งพาการทดลอง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงใช้เวลานาน หรือ อาจต้องมีการทดลองซ้ำซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งอาจเกิดความผิดพลาดทำให้ผลออกมาไม่ถูกต้อง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาเหล่านี้ จึงได้มีการนำเอาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเข้าแก้ปัญหา ซึ่งเป็นการแก้ระบบสมการที่ประกอบด้วยสมการของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งสมการเหล่านี้จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งในการแก้ปัญหาก็ต้องทำการ Discretization ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ Equation discretization, Spatial discretization และ Temporal discretization โดยที่ Equation discretization เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงสมการควบคุม (Governing equations) เป็นการแก้ปัญหาลักษณะเชิงตัวเลข (Numerical analogue) ที่สามารถแก้ปัญหได้ด้วยคอมพิวเตอร์มีอยู่ 3 วิธีหลัก ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method) และระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) โดยที่ระเบียบวิธีทางตัวเลขนี้จะเปลี่ยนจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางกายภาพ ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equation) ซึ่งสามารถหาผลเฉลยได้ง่ายขึ้น การแบ่งพื้นที่ในการคำนวณ (Computational domain) จะถูกแบ่งออกเป็นขนาดเล็กๆ Structured mesh, Unstructured mesh และ Multi-structure mesh และในส่วนของเวลา (Time discretization) เป็นการแบ่งเวลาในการไหลต่อเนื่อง ออกเป็นขั้นๆ (Time step)

2.1.1 สมการควบคุมพื้นฐานสำหรับการไหล (Governing equation of fluid dynamic)

สมการควบคุมพื้นฐานเพื่อคำนวณค่าความเร็ว ความดัน และ อุณหภูมิในสนามการไหล จะถูกพิจารณาในปริมาตรควบคุม (Control volume) โดยสมการดังกล่าวอาจเขียนให้อยู่ในรูปทั้ง Integral form และ Differential form แต่ในการแก้ปัญหามักใช้รูปของ Integral form ค่อนข้างทำได้ยาก ดังนั้นในการพิจารณาสมการการไหลจะพิจารณาในรูปแบบ Differential form เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสมการดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการโมเมนตัม (Momentum equation) สมการพลังงาน (Energy equation)

ในการศึกษาการไหลของของไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าของตัวแปรไม่คงที่ และค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป ดังเช่นตัวอย่างของความเร็ว U ที่แสดงในรูปที่ 2.1 ทำให้การคำนวณค่าตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นเป็นอันมาก เพราะฉะนั้นจึงสมมติว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยใช้หลักการ Reynolds decomposition คือ แบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น $\bar{U}$, $\bar{V}$ หรือ $\bar{P}$ กับส่วนที่แทนผลของความแปรปรวน ที่ขึ้นกับเวลา เช่น u' , v' หรือ p'



รูปที่ 2.1 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน [12]

สมการพื้นฐานของการไหล จะประกอบไปด้วย สมการคือ สมการความต่อเนื่อง 3 (Continuity equation) สมการโมเมนตัม (Momentum equation) และสมการพลังงาน (Energy equation) สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการมีพื้นฐานมาจากกฎของการอนุรักษ์มวล โดยหลักการของสมการคือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล, U คือความเร็ว

สมการโมเมนตัม (Momentum equation) เป็นการประยุกต์กฎข้อที่ 2 ของนิวตันสำหรับการเคลื่อนที่ ซึ่งสมการโมเมนตัมจะถูกแสดงในเทอมของความดันและความเค้นของความหนืด ที่กระทำกับอนุภาคของของไหล โดยหลักการของสมการคือ

$$\frac{\partial \rho \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla (\rho \bar{U}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{U}) + \rho \bar{f} \quad (2.2)$$

2.1.2 การจำลองแบบความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ใช้แก้ปัญหาการไหลที่มีพื้นฐานมาจากสมมติฐานที่อัตราการกระจายตัวของการไหลปั่นป่วน ซึ่งอัตราการกระจายตัว (Dissipation rate, ε) ของพลังงานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L} \quad (2.3)$$

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ของการไหล, L คือ ความยาวที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาดความกว้างของท่อโดยที่ อัตราการกระจายตัวจะสัมพันธ์กับความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity, μ_t) อ้างอิงมาจาก แบบจำลอง Prandtl mixing length model

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

เมื่อ C_μ คือ ค่าคงที่จากการทดลอง, ρ คือความหนาแน่นของของไหล และเมื่อนำสมการข้างบนไป แทนในสมการตั้งต้นของการไหล จะได้สมการ k ของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + U_i \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j}}_{\text{Convection term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)}_{\text{Diffusion term}} + \underbrace{\mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)}_{\text{Production term}} \underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon}_{\text{Destruction term}} \quad (2.5)$$

และสมการ ε ของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.6)$$

ทางกายภาพ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์จะสัมพันธ์กับการพา (Convection) และการกระจายตัว(Diffusion) ของการเคลื่อนที่เฉลี่ยของการไหล พจน์การกระจายตัวสามารถถูกทำให้อยู่ในรูปการกระจายตัวตามเวลา (Gradient diffusion) เพื่อสมมติเป็นการส่งผ่านโมเมนตัมของความปั่นป่วน (Turbulent momentum transport) นั่นคือถูกสมมติเป็นสัดส่วนของความเร็วเฉลี่ยตามเวลา(Mean velocity gradient) พจน์ Productionที่เป็นส่วนมาจากการส่งผ่านของพลังงานจากการไหลเฉลี่ยไปเป็นการไหลปั่นป่วน ที่ถูกถ่วงดุลด้วยผลของความเค้นเรย์โนลด์ส(Reynolds Stress) และความเร็วเฉลี่ยตามเวลา (Mean velocity gradient) ส่วนพจน์ Destructionจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียของพลังงานไปเป็นความร้อนที่เกิดจากความหนืดธรรมชาติของการไหล

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ จะประสบปัญหาในเรื่องของการคาดเดาค่าเกินความเป็นจริงบริเวณใกล้ผิวผนังท่อ เนื่องจากชั้นขอบเขตมีผลกระทบมาจากความหนืดธรรมชาติของการไหล ซึ่งต้องทำการเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ให้มากขึ้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของคำตอบมีค่าน้อยลง แต่ในการเพิ่มจำนวนของอิลิเมนต์ให้มากขึ้นนั้นส่งผลให้ต้องใช้พื้นที่ในการคำนวณและความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ค่อนข้างสูง และใช้เวลามาก ดังนั้นในการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ ต้องทำการเลือกความละเอียดของจำนวน Mesh ให้เหมาะสม

2.1.3 ภาพรวมในการพิจารณาการไหลผ่านตัวขวางการไหล

การไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหล ที่ความเร็วสูงขึ้นจะมีการแยกของการไหลเกิดขึ้นที่จุดที่มีการติดตั้งตัวขวางการไหลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งในการแยกตัวของการไหลที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการแกว่งของของไหลหรือที่เรียกว่า Vortex shedding

เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number)

เลขเรย์โนลด์ส์เกิดจากการไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหล เลขเรย์โนลด์ส์เล็กน้อยที่สอดคล้องกับการชะลอการไหลหนืดที่เกิดจากแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์การไหลจะมีลักษณะตามค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและการเกิดของการหมุนวน (Vortices) และความปั่นป่วน ซึ่งจะสามารถหาค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลรอบตัวขวางการไหลได้ดังนี้

$$Re = \frac{uD}{\nu} \quad (2.7)$$

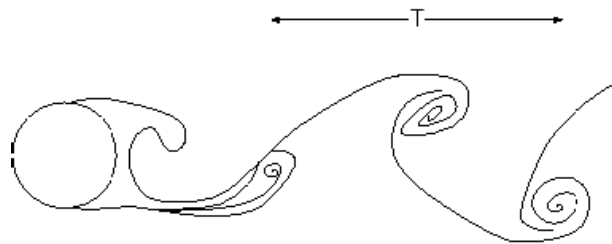
เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของตัวขวางการไหล

u คือ ความเร็วขาเข้าของการไหล

ν คือ ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ของการไหล

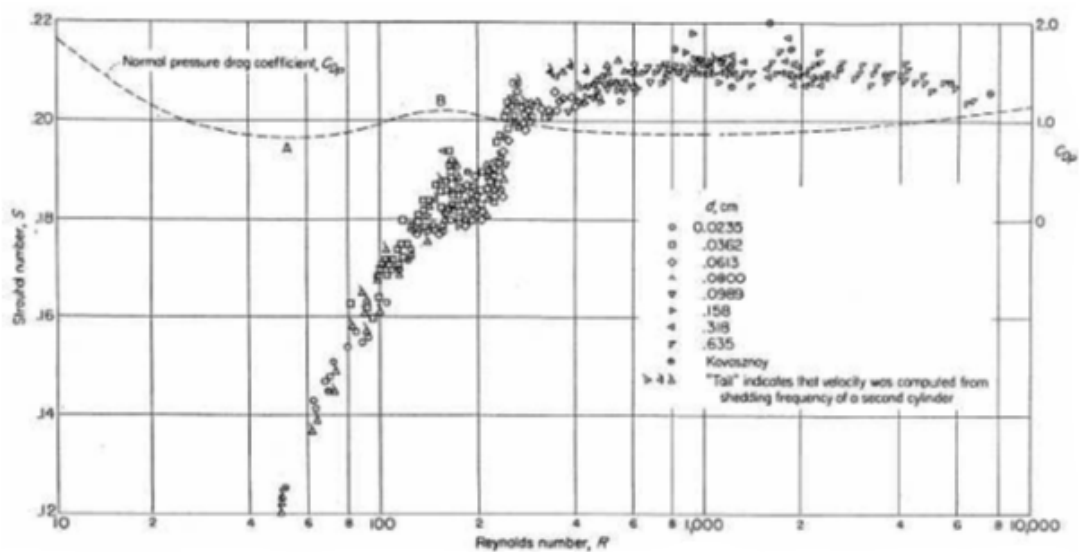
Vortex shedding และ Strouhal number

การแยกของการไหลรอบๆตัวขวางการไหลเป็นสาเหตุของก๊อวนหมุนวนที่เกิดขึ้นสลับบนล่างจนทำให้เกิดการแกว่งของการหมุนวน (Vortex shedding) ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 การเกิด Vortex shedding [13]

รูปที่ 2.2 แสดงพฤติกรรมของการไหลผ่านตัวขวางการไหลรูปทรงกระบอกกลม โดยมีช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ $250 < Re < 10,000$ ความถี่ของการแกว่งของการหมุนวนมีแนวโน้มที่ค่อนข้างเกือบคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของ Strouhal number, Drag coefficient และ Reynolds number [13]

Strouhal number คือ ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless parameter) ที่อธิบายการแกว่งของการหมุนวนในพื้นที่การหมุนควงของการไหล ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความถี่ของการแกว่งที่อาจเกิดจากความเร็วลม

$$St = \frac{f_s D}{u} \quad (2.8)$$

เมื่อ u คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

f_s คือ ความถี่การแกว่งของการหมุนวน ($1/T$)

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสมา (Plasma)

2.2.1 อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์

การศึกษาทางด้านอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์เป็นการศึกษาพฤติกรรมของไหลภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า หรือปฏิกิริยาภายใต้สนามไฟฟ้ากับของไหล ปฏิกิริยาภายในดังกล่าวสามารถทำให้เกิดผลในปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การปั่นป่วน และการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนที่ของไหลทั่วไปอันเนื่องมาจากแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนของไหล จะสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.1.1 สมการควบคุมทางไฟฟ้า

สมการควบคุมอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์เป็นสมการที่ลดรูปมาจากสมการแมกซ์เวลล์ และสมการอนุรักษ์การไหลของของไหล ซึ่งสมการเหล่านั้นสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบสมการควบคุมทางไฟฟ้าในอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ที่ง่ายขึ้น

กฎของเกาส์ ฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิ ที่ตัดผ่านผิวปิดจะมีค่าเท่ากับประจุที่อยู่ภายในผิวปิดนั้นโดย

$$\nabla \cdot D = \rho_e \quad (2.9)$$

เมื่อ D คือเวกเตอร์การขจัด ถูกนิยามเป็น $D = \epsilon E$ โดยที่ ϵ คือ ค่า Permittivity ของตัวกลาง[14]

จากธรรมชาติของสนามที่ไม่มีภาระหมุนวนจะเกิดจากการเกรเดียนต์ของสนามศักย์
ดังนี้

$$E = -\nabla\phi \quad (2.10)$$

เมื่อ ϕ คือศักย์ไฟฟ้า (Electrostatic potential)

กฎการอนุรักษ์ของประจุ

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad (2.11)$$

2.2.1.2 สมการการไหล

สมการพื้นฐานสำหรับของไหลที่สภาวะการไหลแบบนิวโตเนียนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า จะประกอบสมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัมดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ ซึ่งในสมการโมเมนตัม จะมีพจน์ f ที่เกิดจากแรงไฟฟ้าที่กระทำกับของไหล[15] ดังสมการต่อไปนี้

$$f = \rho_e E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon_o + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \rho \left(\frac{\partial \epsilon_o}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ ϵ_o คือ สภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของอากาศ (Permittivity of air) ปกติมีค่าประมาณ 8.854×10^{-12} มีหน่วยเป็น F/m

เทอมแรก คือแรง Electrophoretic เป็นแรงคูลอมบ์ที่กระทำกับประจุอิสระในสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นประจุ ρ_e ของพาหะประจุอิสระทั้งอิเล็กตรอน ไอออนบวกและไอออนลบ เทอมที่สองคือ แรง Dielectrophoretic คือแรงที่เกิดขึ้นจาก Permittivity gradients และเทอมที่สาม คือ แรง Electrostrictive เป็นแรงที่สำคัญเพียงแค่ว่าของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible) ซึ่งในการพิจารณาแรงที่ตอบสนองต่อการสร้างโคโรนา จะพิจารณาเฉพาะแรงคูลอมบ์ซึ่งจะทำให้สมการที่ 2.12 เป็น

$$f = \rho_e E \quad (2.13)$$

2.2.1.4 การปล่อยประจุโคโรนา (Corona Discharge)

โดยทั่วไป ก๊าซจะมีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าโดยจะมีค่าความคงทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าที่แน่นอน แต่ถ้าความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่ามากเกินไปกว่าค่าดังกล่าวนี้จะเกิดการปล่อยประจุขึ้น ในกรณีที่สนามไฟฟ้าภายในอากาศมีลักษณะเป็นเอกรูปหรือสามารถนำไฟฟ้าได้ตลอดทั้งบริเวณ การปล่อยประจุที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของการเบรกดาวนที่สมบูรณ์ แต่สำหรับสนามไฟฟ้าภายในอากาศที่ไม่เป็นเอกรูป การปล่อยประจุจะเกิดขึ้นแค่ในบริเวณที่มีความเข้มสูง ซึ่งเรียกว่าการเบรกดาวนบางส่วน (Partial Discharge, PD) และสิ่งที่เกิดขึ้นในก๊าซนี้เราจะเรียกว่าการปล่อยประจุโคโรนา ซึ่งก็คือจุดเชื่อมต่อระหว่างการกำเนิดพาหะประจุที่จะส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ใน

กรณีที่มีอิเล็กโทรดหนึ่งทำหน้าที่ปล่อยประจุจะมีลักษณะแหลมจะถูกเรียกว่าอิมิตเตอร์ (Emitters) หรือ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด (Discharge electrode) และอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่รับประจุจะมีลักษณะแบบเรียบจะเรียกว่า คอลเลคเตอร์ (Collector) หรือ คอลเลคตติ้งอิเล็กโทรด (Collecting electrode) โดยที่โหมดการปล่อยประจุโคโรนาแบ่งออกเป็นสองโหมดขึ้นอยู่กับการต่อขั้วของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงกับอิเล็กโทรดทั้งสองนี้ คือ โคโรนาลบและโคโรนาบวก

การเริ่มเกิดโคโรนา

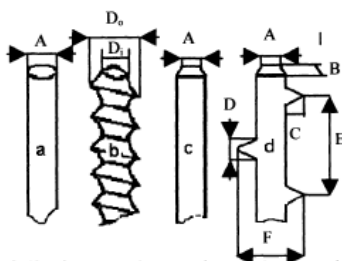
สนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนา คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ต้องการสำหรับอิมิตเตอร์อิเล็กโทรดในการเริ่มต้นปล่อยประจุแบบประทุตัวเอง (Self-sustaining discharge) ซึ่งสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาเป็นฟังก์ชันของรัศมีของความโค้งและสภาพผิวของอิมิตเตอร์อิเล็กโทรด รวมถึงอุณหภูมิและความดันก๊าซ ความเข้มสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาของอิเล็กโทรดแบบลวดและท่อ (Wire-pipe electrode) ภายในอากาศ หาได้จากการทดลองและได้พัฒนาสูตรกึ่งทดลองสำหรับแรงดัน DC ขึ้นคือ

$$E_i = m_G \left(32.15 \times 10^5 \rho_{gf} + 9.902 \times 10^4 \sqrt{\frac{\rho_{gf}}{r_{in}}} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\rho_{gf} = 0.386 \frac{P}{273 + T_g} \quad (2.15)$$

เมื่อ ρ_{gf} คือแฟคเตอร์ของก๊าซ, r_{in} คือ ค่ารัศมีของอิมิตเตอร์อิเล็กโทรดแบบลวด, p คือความดันในหน่วย (Torr), T_g คืออุณหภูมิของก๊าซในหน่วย ($^{\circ}C$), m_G คือค่าแฟคเตอร์ของอิเล็กโทรดปล่อยกระแส ซึ่งมีค่า $m_G \leq 1$ โดยเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



Sketch of discharge electrodes: (a) round $A=\{0.25, 1.5, 3\}$ mm (b) threaded $\{D_o; D_i\}=\{2.5, 2\}$ mm, (c) rectangular $A=2.7$ mm, (d) spike $A=10$ mm, $B=2$ mm, $C=D=9$ mm, $E=80$ mm, $F=28$ mm.

รูปที่ 2.4 รูปทรงต่างๆ ของอิเล็กโทรดแบบลวด [16]

DE /CE types	r_{in} [mm]	m_{DE}	k_G
Round	0.23	0.9	4
	3		
Threaded	1.125	0.55	1.5
Rectangular #90	1.5	0.9	7
Rectangular #45			9
Rigid & short CE	1	0.9	1.3
Rigid & long CE			1.5

Rectangular #90... Discharge and collecting electrode sides are aligned.
 Rectangular #45... Discharge electrode sides are rotated 45° relative to the collecting electrode orientation.

รูปที่ 2.5 ค่า r_{in} , m_G และ k_G [16]

สตรีมเมอร์โคโรนา

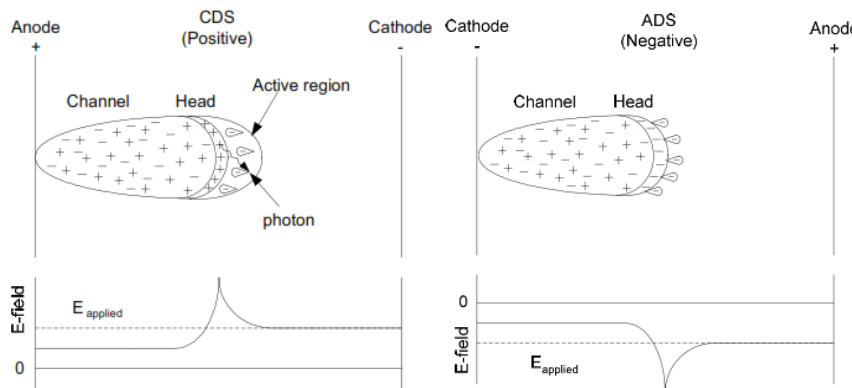
พลาสมา [17] คือของไหล เช่น ก๊าซ หรือของเหลว ที่มีสภาพเป็นไอออน ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว หลุดออกจากโมเลกุลประจุไฟฟ้าอิสระ ทำให้พลาสมา มีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น พลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้โดย การให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นกลุ่มพลาสมาหรือสตรีมเมอร์พลาสมาในที่สุด โดยในการเกิดขึ้นของสตรีมเมอร์พลาสมา ที่มีจุดเริ่มต้นใกล้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรด (Discharge electrode) และเคลื่อนที่ตรงไปยังคอลเลคเตอร์อิเล็กโทรด (Collecting electrode) โดยลักษณะโครงสร้างของสตรีมเมอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนนี้ ขั้นตอนที่ 1 คือการเริ่มเกิดอะวาลานซ์ (Electron avalanche phase) ขั้นตอนที่ 2 คือการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ (Streamer phase) และขั้นตอนที่ 3 คือการเกิดกระบวนการซ้ำหลังจากที่สตรีมเมอร์ผ่านช่องอากาศ

การเริ่มสตรีมเมอร์นั้นต้องมีอิเล็กตรอนอิสระประมาณ 10^1 - 10^3 electron/cm³ เป็นอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากก๊าซลบ (Electronegative gasses) ซึ่งเกิดจากถูกแรงภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการไอออไนซ์ด้วยการชนของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้า และขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนตัวภายใต้สนามไฟฟ้านั้นอาจจะเกิดการไอออไนซ์โดยการชนขึ้นอีกเป็นทวีคูณ มักจะแทนด้วยสัมประสิทธิ์ของทาวน์เซนด์ (Townsend coefficient, α) ซึ่งแสดงจำนวนการเกิดปฏิกิริยาไอออไนเซชัน ของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่เคลื่อนที่ได้ระยะทาง 1 เซนติเมตร ในทิศทางสนามไฟฟ้า

ผลการเกาะติดสามารถพิจารณาด้วยสัมประสิทธิ์การเกาะติด (Attachment coefficient, α) ซึ่งหมายถึงจำนวนการเกาะติดต่อระยะ 1 เซนติเมตร ที่เคลื่อนตัวในทิศทางสนามไฟฟ้า ทั้ง α และ η ผลต่างของทั้งสองคือ สัมประสิทธิ์การไอออไนซ์รวม (Net-ionization, $\bar{\alpha}$) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นก๊าซ ถ้า $\bar{\alpha} > 0$ จำนวนอิเล็กตรอนจะมีการเพิ่มเป็นแบบเอ็กซีโปเนนเชียลส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอน อะวาลานซ์แต่ถ้า $\bar{\alpha} < 0$ จะไม่เกิดการปล่อยประจุเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนลดลง ในสภาวะอากาศที่อุณหภูมิและความดันปกติ (NTP: 293 K, 1bar) ต้องใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 kV/cm ในการทำให้ $\bar{\alpha} > 0$ [18]

อิเล็กตรอนอะวาลานซ์จะสร้างสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยตัวเองเนื่องจากอิเล็กตรอนและไอออนบวกเคลื่อนตัวสวนทางกัน ปัจจุบันนี้นอกจากการพิจารณารูปทรงการเคลื่อนที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขสำหรับการเปลี่ยนเป็นสตรีมเมอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ และค่าวิกฤตของประจุค้างซึ่งมีค่าประมาณ 10^9 - 10^{10} ตัว

สตรีมเมอร์มีลักษณะเป็นการเพิ่มสนามไฟฟ้าขนาดใหญ่ ในบริเวณหัวสตรีมเมอร์ตามการเคลื่อนที่ การเพิ่มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไอออนไนซ์สุทธิ $\bar{\alpha}$ มีค่าเป็นบวก ต่อมาอิเล็กตรอนใหม่ถูกสร้างขึ้นจำนวนมากตรงบริเวณส่วนหัวสตรีมเมอร์การเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ จะไปตามทิศทางของการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้า ผลทำให้เกิดช่องนำกระแสสตรีมเมอร์ขึ้น



รูปที่ 2.6 สตรีมเมอร์ในทิศทางแคโทด (CDS) และสตรีมเมอร์ในทิศทางแอโนด (ADS) [19]

จากรูปที่ 2.6 แสดงสตรีมเมอร์ในทิศทางแคโทด (Cathode directed streamer, CDS) และสตรีมเมอร์ในทิศทางแอโนด (Anode directed streamer, ADS) แสดงสตรีมเมอร์สนามไฟฟ้าวรวม สนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย E_{applied} คงที่ภายในช่องคือ พลาสมา (Quasi-neutral plasma) ซึ่งมีสนามไฟฟ้าวรวมต่ำกว่าสนามไฟฟ้า E_{applied} ทิศทางของหัวสตรีมเมอร์ สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้นของประจุค้าง แต่ที่ระยะห่างออกไปมากสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ E_{applied} ขนาดของหัวและบริเวณแอคทีฟ จะมีการเพิ่มมากกว่าเมื่อเทียบกับช่องสตรีมเมอร์ ดังนั้นบริเวณแอคทีฟและหัวสตรีมเมอร์ไม่สามารถแยกออกจากกันอย่างชัดเจน

ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำสุดสำหรับการสร้างสตรีมเมอร์ ในอากาศมีค่าประมาณ $\sim 10^2$ 10^3 kV/cm ดังนั้นสนามไฟฟ้าความเข้มสูงสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดที่มีความไม่เอกรูปสูงการกระตุ้นด้วยแรงดันสูงแบบพัลส์แคบ เพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ที่สมบูรณ์ที่ช่องอากาศ ถ้าสนามไฟฟ้าในบริเวณอิเล็กโทรดที่มีปลายแหลมเริ่มเกิดแล้วจะเกิดสตรีมเมอร์ขึ้น สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำหัวสตรีมเมอร์ ทำให้สตรีมเมอร์ขยายตัวออกไปได้อย่างต่อเนื่อง

การเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของสตรีมเมอร์ มีความสำคัญในการสร้างอิเล็กตรอนอิสระขึ้นใหม่เพื่อพัฒนาไปสู่อะวาลานซ์อีก ตรงจุดนี้เราจะแบ่งสตรีมเมอร์ออกเป็นสองแบบ คือ สตรีมเมอร์ในทิศทางแคโทด CDS และสตรีมเมอร์ในทิศทางแอโนด ADS ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีความแตกต่างกันตรงที่การต่อขั้วแรงดันไฟฟ้าเข้ากับอิเล็กโทรด ปลายแหลมและแอคทีฟอิเล็กโทรด ความแตกต่างหลักระหว่าง CDS และ ADS เมื่อพิจารณาตามทิศทางการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย CDS นั้นมีทิศทางขนานไปในแนวเดียวกันกับ

สนามไฟฟ้า ขณะที่ ADS นั้นสวนทางกับสนามไฟฟ้าแต่มีข้อดีตรงที่มีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนขณะที่อิเล็กตรอนทุดิยภูมิถูกสร้างที่ส่วนหัวของสตริมเมอร์ และถูกเร่งให้เคลื่อนตัวไปในทิศทางของสตริมเมอร์ สำหรับ CDS นั้นมีความยุ่งยากมากกว่าเพราะการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนสวนทางกับสตริมเมอร์ ดังนั้นกลไกการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของ CDS นั้นต้องมีการสร้างอิเล็กตรอนอิสระในเปลือกรอบส่วนหัวของสตริมเมอร์ และจะถูกเร่งเข้าสู่หัวสตริมเมอร์ถ้าอิเล็กตรอนเกิดขึ้นห่างจากหัวสตริมเมอร์มาก สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำทำให้สัมประสิทธิ์การไอออไนซ์สุทธิมีค่าเป็นบวก บริเวณที่เหมาะสมสำหรับการสร้างอะวาลานซ์ขึ้นมาใหม่คือบริเวณแอคทิฟแสดงในรูปที่ 2.6

สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระภายในบริเวณแอคทิฟนั้นคือ โฟโตไอออไนเซชัน โฟตอนที่เกิดขึ้นจากหัวสตริมเมอร์สามารถไอออไนซ์โมเลกุลในระยะใกล้ได้ เมื่อเกิดสตริมเมอร์ซ้ำขึ้นอีกยังทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นอีก สตริมเมอร์จะเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องในช่องอากาศ เมื่อสนามไฟฟ้าตรงส่วนหัวสตริมเมอร์มีค่ามากพอ ที่จะทำให้สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันสุทธิมีค่าเป็นบวก เมื่อจ่ายแรงดันสูงมากพอที่จะทำให้ช่องสตริมเมอร์คงอยู่บริเวณหลังของหัวสตริมเมอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 5-8.5 kV/cm สำหรับ CDS ในอากาศ แล้วสำหรับ ADS สนามไฟฟ้าเฉลี่ยนั้นมีค่าประมาณ 12kV/cm ในการกระตุ้นรีแอคเตอร์นั้นจะเห็นว่าการทำให้เกิด ADS จะต้องใช้แรงดันสูงกว่า นอกจากนั้นขนาดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสตริมเมอร์ยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของก๊าซและลักษณะโครงสร้างของรีแอคเตอร์

อิเล็กตรอนความเร็วสูงชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดไอออไนเซชัน และสตริมเมอร์พลาสมาประกอบด้วยไอออนบวกและลบจำนวนมากและรังสี อีกทั้งยังมีคลื่นเสียงจากพลาสมาและการสั่นทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ให้เกิดการรวมกันของอนุภาคขนาดเล็กหรือการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กกับอนุภาคขนาดใหญ่ ภายใต้สตริมเมอร์พลาสมา แต่เนื่องจากความเร็วของก๊าซหรืออนุภาคที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์พลาสมา ทำให้ประสิทธิภาพในการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคขนาดเล็กเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการติดตั้งตัวขวางการไหลในการสร้างการหมุนวนของของไหลที่ด้านหลังของตัวขวางการไหล เพื่อช่วยในการชะลอการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของไหล ทำให้อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กเกิดประจุ หรือความไม่เป็นกลางทางไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนเกิดการตกตะกอนในที่สุด ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาผลการหมุนควงของของไหลเนื่องจากตัวขวางการไหล ที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก

2.2.1.5 การปล่อยประจุโคโรนา (Corona Discharge)

การศึกษาพลาสมาแบบพัลส์ อากาศที่ความดันบรรยากาศที่อยู่ระหว่างระยะห่างของอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่ปล่อยแรงดันไฟฟ้าและอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นกราวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงอากาศบริเวณดังกล่าวจะเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอน ประจุบวก ประจุลบ ซึ่งความหนาแน่นของประจุจะสามารถหาได้จากสมการความต่อเนื่อง[20] ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_j = S_j \quad (2.16)$$

โดยที่ $\Gamma_j = -D_j \cdot \nabla n_j - (\mu_j \cdot E) n_j \quad (2.17)$

และ $S_e = (\alpha - \eta) n_e v_e - \beta n_e n_p \quad (2.18)$

$$S_p = \alpha n_e v_e - \beta n_e n_p - \beta n_n n_p \quad (2.19)$$

$$S_n = \eta n_e v_e - \beta n_n n_p \quad (2.20)$$

ซึ่ง j จะประกอบด้วย e คือ อิเล็กตรอน p คือโฮออนบวก และ n คือโฮออนลบ

เมื่อ n_j คือ ความหนาแน่นของ e , p และ n , t คือ เวลา, D_j คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว, α คือ สัมประสิทธิ์การแตกตัว, β คือ สัมประสิทธิ์การรวมตัว, η คือ สัมประสิทธิ์การเกาะติด

สำหรับค่าความเร็วในการลอย (Drift velocities, v_j) ของอิเล็กตรอน โฮออนบวก และโฮออนลบ หาได้จาก

$$v_j = \mu_j E \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.16) เป็นสมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน ประจุบวก และ ประจุลบ โดยด้านซ้ายมือเทอมแรกเป็นเทอมของความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เทอมที่สองคือฟลักซ์ของอนุภาค ซึ่งจะถูกแยกเป็นอีก 2 เทอมดังสมการที่ (2.17) เทอมแรกเป็นเทอมของฟลักซ์เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของอนุภาค เทอมที่สอง คือเทอมของฟลักซ์เนื่องจากการลอยของอนุภาคที่ถูกชาร์จ ส่วนเทอมสุดท้ายที่อยู่ด้านขวามือของสมการ(2.16) เป็นเทอมที่แสดงแหล่งที่มาของอนุภาค ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาหลักๆ คือ การแตกตัว (α) การรวมตัว (β) และการเกาะติดของอิเล็กตรอน (η) จะสามารถแสดงปฏิกิริยาดังนี้

Ionization (α)	$e + A \rightarrow A^+ + 2e$
Recombination (β)	$e + A^+ \rightarrow A \quad \text{or} \quad A^- + A^+ \rightarrow A$
Attachment (η)	$e + A \rightarrow A^-$

กระบวนการรวมตัวของโฮออนกับโฮออน หรืออิเล็กตรอนและโฮออนจะทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาบางส่วนทำให้เกิดในลักษณะของแสงสีม่วง ซึ่งจะสามารถปรากฏให้เห็นในลักษณะของการทดสอบจริง

การกระจายตัวของความหนาแน่นของการชาร์จภายในจะสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ Poisson ดังนี้

$$\nabla \phi^2 = -\frac{e}{\epsilon_o} (n_p - n_e - n_n) \quad (2.22)$$

เมื่อ e คือ ประจุไฟฟ้า (Electric charge) โดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

สนามไฟฟ้าทั้งหมด จะหาได้จากสนามไฟฟ้าหลักที่ป้อนให้เกิดโคโรนา ($E_{Laplacian}$) รวมกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นปฏิกิริยาทางไฟฟ้า ($E_{Space\ charge}$) ทั้งการแตกตัว การรวมตัว และการเกาะติดของอิเล็กตรอนซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$E = E_{Laplacian} + E_{Space\ charge} \quad (2.23)$$

2.3 การชาร์จอนุภาคขนาดเล็กด้วยให้เกิดประจุไฟฟ้าด้วยพลาสมา

โดยทั่วไปการชาร์จอนุภาคขนาดเล็กด้วยสนามพลาสมาจะเกิดการชาร์จด้วยไอออนและอิเล็กตรอน ซึ่งกระบวนการหลักจะเกิดขึ้น 2 กระบวนการคือ Field charging และ Diffusion charging [21] โดยที่ Field charging คือการชาร์จอนุภาคด้วยไอออนแบบขั้วเดียว (Unipolar) ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอกหรือเกิดการการป้อนสนามไฟฟ้าแรงสูงแล้วทำให้อากาศเกิดการแตกตัว โดยอนุภาคขนาดเล็กจะถูกชาร์จจนอิ่มตัวหรือไม่สามารถรับไอออนจากการชาร์จเพิ่มเข้าไปอีกได้ ซึ่งการอิ่มตัวดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคขนาดเล็กดังกล่าว ดังนั้นการชนกันของไอออนและอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าภายนอก การชาร์จแบบ Diffusion charging จะเป็นกลไกที่อนุภาคจะถูกชาร์จเนื่องจากการชนของไอออนแบบซุ่ม โดยจะไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกมาเกี่ยวข้อง การชาร์จแบบไอออนจะมีทั้งแบบขั้วเดียว (Unipolar) และสองขั้ว (Bipolar) ซึ่งอัตราการชาร์จสะสมจะมีอัตราลดลงเรื่อยๆ

จากการชาร์จอนุภาคขนาดเล็กด้วยพลาสมาจะทำให้อนุภาคเกิดความต่างศักย์ขึ้น ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งบวกและลบ และอนุภาคเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวของอนุภาคจนอนุภาคเหล่านี้ไม่เกิดความต่างศักย์หรือเกิดความเป็นกลางขึ้น โดยผลดังกล่าวจะทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นการช่วยลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และช่วยให้ง่ายต่อการดักจับด้วยระบบ ESP

2.4 การคำนวณประสิทธิภาพการลดลงของอนุภาคขนาดเล็ก

เมื่ออนุภาคฝุ่นเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เกิดพลาสมา อนุภาคเหล่านั้นจะถูกการชาร์จ จนทำให้อนุภาคเกิดขั้วไฟฟ้าขึ้นทั้งขั้วบวกและลบ ซึ่งจะทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสามารถศึกษา ผลการลดลงของอนุภาค ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_r = 1 - \frac{n_{charged}}{n_{uncharged}} \quad (2.24)$$

เมื่อ $n_{uncharged}$ = จำนวนอนุภาคเฉลี่ยขณะที่ไม่มีการสร้างพลาสมา (จำนวนอนุภาค/ cm^{-3})

$n_{charged}$ = จำนวนอนุภาคเฉลี่ยขณะที่มีการสร้างพลาสมา (จำนวนอนุภาค/ cm^{-3})