สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

สตรีมเมอร์ คือ กลุ่มของพลาสมา (plasma) ที่มีลักษณะเป็นเส้น เกิดจากการเคลื่อนที่ของบริเวณที่เกิดไอออไนเซชัน (ionization) ซึ่งเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากที่บริเวณส่วนหัวของสตรีมเมอร์ การเกิดสตรีมเมอร์เนื่องมาจากการป้อนแรงดันสูงระหว่างอิเล็กโตรดได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตแก๊สโอโซน และหลอดไฟแบบ HID (High Intensity Discharge Lamp) เป็นต้น นอกจากนี้การเกิดสตรีมเมอร์ยังเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดฟ้าผ่าในธรรมชาติ การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) และการเบรกดาวน์ของอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ในระบบทำงานผิดพลาด เกิดกำลังสูญเสีย (power loss) ในระบบและที่ร้ายแรงที่สุดคือทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าลดลง

1.2 ที่มาของปัญหา

ในอดีตการคำนวณค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage) หรือแรงดันเบรกดาวน์ (breakdown voltage) ของแก๊สสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ได้จากความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [1,2] ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถใช้หาค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดหรือแรงดันเบรกดาวน์ได้เพียงอย่างเดียว โดยขึ้นกับค่าพารามิเตอร์บางตัว เช่น ระยะแกป ความดันอากาศ หรือลักษณะรูปร่างของอิเล็กโตรด เป็นต้น นอกจากนี้ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดหรือแรงดันเบรกดาวน์ยังสามารถคำนวณหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ [3-7] เช่น ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ (Townsend breakdown mechanism) ดังสมการ

$$\gamma \int_0^d e^{\int_0^x \bar{\alpha} dx} \alpha \, dx = 1 \tag{1.1}$$

หรือทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer mechanism) ดังสมการ

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha} \, dx = K \tag{1.2}$$

เมื่อ γ คือสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันที่สองของทาวน์เซนด์
(Townsend's secondary ionization coefficient)
α คือสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวน์เซนด์
(Townsend's first ionization coefficient)
$\bar{\alpha}$ คือสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันยังผล (effective ionization coefficient)
ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\alpha - \eta$
η คือสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนเป็นไอออนลบ (attachment coefficient)
x_c คือระยะของอะวาลานซ์วิกฤต (critical avalanche length)
d คือระยะแกป (gap spacing)
K คือค่าคงตัวสตรีมเมอร์ (streamer constant)

แต่อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวไม่สามารถใช้อธิบายกลไกหรือกระบวนการที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดโคโรนาดีสชาร์จหรือการเบรกดาวน์ได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ และขนาดของกระแสที่ไหลในวงจรภายนอก เป็นต้น

ต่อมาได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรือการเบรกดาวน์ในแก๊ส เริ่มจากการใช้สมการเชิงอนุพันธ์อย่างง่าย [8] อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเพียงชนิดเดียวภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอในแบบจำลองแบบ 1 มิติ โดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical method) ในการหาผลเฉลยของสมการ จากนั้นจึงเริ่มมีการเพิ่มชนิดของอนุภาคและกระบวนการเกิดไอออไนเซชันขั้นต้น (primary process) [9] เช่น การไอออไนเซชันเนื่องจากการชน (collision ionization) ของอิเล็กตรอนกับอะตอมของแก๊สและการเกิดไอออนลบ (electron attachment process) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนของอนุภาคที่มีประจุ พร้อมกับทำการขยายมิติของแบบจำลองออกเป็นแบบ 1.5 มิติ [10,11] และแบบ 2 มิติ [12] ตามลำดับ และเปลี่ยนวิธีการหาผลเฉลยของระบบสมการเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical method) เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite different method) หรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เป็นต้น เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์เมื่อมิติของแบบจำลองเพิ่มขึ้น และเนื่องจากความสามารถของระบบคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงขึ้นทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง งานวิจัยในระยะเวลาต่อมาจึงเริ่มมีความซับซ้อนมากขึ้น มีการเพิ่มมิติของแบบจำลองออกเป็นแบบ 3 มิติ [13] นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มกระบวนการต่าง ๆ ลงในแบบจำลองเพื่อให้สอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ

หรือสภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ [14-22] เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันป้อนเข้าตามเวลา รูปทรงของอิเล็กโตรด หรือการเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องมาจากกระบวนการขั้นที่สอง (secondary process) ซึ่งได้แก่ การรวมตัวของอนุภาคที่มีประจุ (recombination process) การปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดเนื่องจากการชนของไอออนบวก (impact ionization) และการเกิดโฟโตไอออไนเซชัน (photoionization) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายอิเล็กตรอนที่มีลักษณะไม่เป็นแหล่งจ่ายเฉพาะที่ (non-local source) ได้จากการคิดผลของโฟตอน (photon) ที่เกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สในสภาวะตื่นกระตุ้นทั้งหมดที่อยู่ในบริเวณที่ทำการคำนวณ ทำให้มีความซับซ้อนและยากต่อการคำนวณในแบบจำลองที่เป็นแบบ 2 มิติหรือแบบ 3 มิติ เป็นผลให้งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับโฟโตไอออไนเซชันทำการลดรูปสมการที่ใช้ในการคำนวณการเกิดโฟโตไอออไนเซชันลงเหลือการคำนวณเพียงในแบบ 1 มิติ จากการศึกษาแบบจำลองทั้งหมดที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น พบว่าไม่มีแบบจำลองใดที่กล่าวถึงหลักเกณฑ์หรือข้อกำหนดที่ใช้ในการพิจารณาว่าเมื่อใดจะมีการเบรกดาวน์เกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาแรงดันเบรกดาวน์หรือขนาดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญที่ใช้ในการออกแบบฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง

1.3 **บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

ตารางที่ 1.1 แสดงรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ (electron avalanche) โคโรนาดีสชาร์จ หรือสตรีมเมอร์ในแก๊สที่เป็นกลาง

จากตารางที่ 1.1 พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายกระบวนการหรือปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการอะวาลานซ์ การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ หรือการเกิดสตรีมเมอร์ โดยทำการคำนวณการกระจายตัวของอนุภาคที่มีประจุ สนามไฟฟ้า และค่ากระแสที่ไหลในวงจรภายนอกเพียงช่วงเวลาหนึ่ง แต่ไม่ได้มีการกล่าวถึงข้อกำหนดหรือหลักเกณฑ์ในการตัดสินว่าเมื่อใดจะเกิดการเบรกดาวน์ของแก๊สตัวกลางในแบบจำลองที่ทำการพิจารณา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการเสนอหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ในแกปอากาศที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการนำไฟฟ้าในแก๊ส

วิธีการหาผลเฉลย	ผู้วิจัย	งานวิจัย	ระบบสมการ	ผลการวิจัย
วิธีเชิงวิเคราะห์	Markus Zahn, Cheung Fung Tsang And Shing-Ching Poa [8]	ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเพียงหนึ่งขนิดภายใต้สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน	สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)	- ผลเฉลยที่ได้จากแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์สามารถใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้
	C. Wen and J.M. Wetzer [9]	ศึกษาผลของการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (electron detachment) และการเปลี่ยนสภาพเป็นไอออน (ion conversion) ที่มีต่ออิเล็กตรอนอะวาลานช์ ในอากาศระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุ*	- ขนาดและความชันของกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนมีค่าสูงขึ้น - ขนาดของกระแสจะมีค่าลดลง เมื่อสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนมีค่าสูงขึ้น
วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	R. Morrow [10]	ศึกษาลักษณะกระแสและการกระจายตัวของอนุภาคของโคโรนาลบ (negative corona) ในแก๊ส O_2 ระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง**	- สามารถแบ่งการเกิดพัลส์กระแสเนื่องจากโคโรนาลบออกเป็น 5 ช่วง
	R. Morrow [11]	ศึกษาการเกิดสตรีมเมอร์บวก(positive streamer) ในแก๊ส SF_6 ระหว่างอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ โดยกำหนดให้รัศมีของสตรีมเมอร์มีค่าคงที่และไม่คิดผลของ 2^{nd} อิเล็กตรอนจากแคโทด	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- ความเร็วเฉลี่ยของสตรีมเมอร์มีค่าเท่ากับ 1.3×10^8 cm/s - แสงที่เกิดจากสตรีมเมอร์สามารถประมาณได้จากปริมาณการเกิดไอออไนเซชัน
	Jing-Ming Guo and Chwan-Hwa John Wu [12]	ศึกษาการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ในแก๊ส N_2 ระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน	สมการโมเมนต์อันดับที่ 1, 2 และ 3 ร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- ความเร็วของสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ไปยังแคโทด (cathode direct streamer) มีค่าสูงกว่าความเร็วของสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ไปยังแอโนด (anode direct streamer) - ความเร็วของสตรีมเมอร์ที่ได้จาก non-equilibrium fluid model จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จาก fluid model

* Charge continuity equation **Poisson's equation

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการนำไฟฟ้าในแก๊ส (ต่อ)

วิธีการหาผลเฉลย	ผู้วิจัย	งานวิจัย	ระบบสมการ	ผลการวิจัย
วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	J.T. Kennedy, M.G.M. Megens and J.M. Wetzer [14]	ศึกษาการปล่อยอิเล็กตรอนด้วยโฟตอน (photoelectron emission) จากแคโทดในขณะเกิดดีสชาร์จในแก๊ส N_2 และอากาศ ระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่ายอดอยู่ 2 ค่า โดยค่าแรกเกิดจากการอะวาลานช์ของอิเล็กตรอนเริ่มต้น และอีกค่าเกิดจากการอะวาลานช์ของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยจากแคโทด - ความแตกต่างของระยะเวลาระหว่างค่ายอดกระแสจะมีค่าลดลงเมื่อความดันของแก๊สมีค่าสูงขึ้น
	N. Yu Babaeva and G.V. Naidis [15]	ศึกษาผลของรัศมีของอิเล็กโตรดและแรงดันป้อนเข้าที่มีต่อสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ไปยังแคโทดในอากาศ ระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ไปยังแคโทด ขนาดกระแส และรัศมีของสตรีมเมอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้น - เมื่อรัศมีของอิเล็กโตรดมีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ไปยังแคโทด ขนาดกระแส และรัศมีของสตรีมเมอร์จะมีค่าลดลง
	A.A. Kulikovsky [17]	ศึกษาผลของโฟโตไอออไนเซชันที่มีต่อสตรีมเมอร์บวกในอากาศและแก๊ส N_2 ระหว่างอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ โดยสมมติให้การเกิดโฟโตไอออไนเซชันมีรัศมีการเกิดคงที่และมีค่าเท่ากับค่าที่คำนวณได้ตามแนวแกน z	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- ความกว้างของชั้นประจุที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์สามารถหาได้จากความยาวการดูดกลืนรังสีที่เกิดจากโฟโตไอออไนเซชัน - ความเร็วเฉลี่ยของสตรีมเมอร์บวกของมีค่าเท่ากับ 2.7×10^7 cm/s
	Woong-Kee Min, Jae Bum Park, Sung-Chun Choi and Jungwon Kang [18]	ศึกษาการเกิดโคโรนาลบในอากาศระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน โดยใช้การแบ่งเอลิเมนต์แบบ unstructured grid	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- จำนวนกริดที่ใช้ใน unstructured grid มีจำนวนเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนกริดที่ใช้ใน structured grid - การใช้ unstructured grid ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง อีกทั้งยังลดขนาดของหน่วยความจำที่ต้องใช้ในการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการนำไฟฟ้าในแก๊ส (ต่อ)

วิธีการหาผลเฉลย	ผู้วิจัย	งานวิจัย	ระบบสมการ	ผลการวิจัย
วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	Alejandro Luque, Carolynne Montijn, Ute Ebert and Willem Hundsdorfer [19]	ศึกษาผลของโฟโตไอออไนเซชันที่มีต่อสตรีมเมอร์ลบในอากาศระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน โดยใช้วิธีการแบ่งกริดแบบ adaptive refinement	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- ในสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงความเร็วของสตรีมเมอร์จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากโฟโตไอออไนเซชันที่เกิดขึ้นมากบริเวณส่วนหัวของสตรีมเมอร์ - โฟโตไอออไนเซชันมีส่วนในการยับยั้งการเกิดกิ่งของสตรีมเมอร์ เพราะทำให้การกระจายตัวของอนุภาคเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน
	Jianfeng Hui, Zhicheng Guan, Liming Wang and Qiuwei Li [20]	ศึกษาผลของความชื้นและความดันอากาศที่มีต่อสตรีมเมอร์บวกที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- สนามไฟฟ้าประสิทธิผลจะมีค่าลดลงเมื่อผลคูณระหว่างความดันอากาศและความชื้นมีค่าลดลง แต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อความเร็วเฉลี่ยของสตรีมเมอร์ - ความนำไฟฟ้าของสตรีมเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันอากาศมีค่าลดลง - ความนำไฟฟ้าของสตรีมเมอร์มีค่าลดลงเมื่อความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น
	Xianghan Wang, Feng Wang, Wolfgang Pfeiffer and Nikolai Kouzichine [21]	ศึกษาการเกิดสตรีมเมอร์ในแก๊สผสม N_2-SF_6 ที่เกิดในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- การบิดเบือนของสนามไฟฟ้า (field distortion) ที่เกิดจากสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ไปยังแคโทดจะมีมากกว่าสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ไปยังแอโนดเมื่อลำของสตรีมเมอร์เกือบเชื่อมต่อแกปทั้งหมด - ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์บวกที่เกิดขึ้นในแก๊สผสม N_2-SF_6 มีค่ามากกว่าความเร็วในแก๊สตัวกลางที่เป็น SF_6 เพียงชนิดเดียว
	Jin Myung Park, Yong-Ho Kim and Sang Hee Hong [13]	ศึกษาการเกิดสตรีมเมอร์ในอากาศ ระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม โดยใช้โมเดลแบบ 3 มิติ	สมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุร่วมกับสมการปัวร์ซอง	- สนามไฟฟ้าที่บริเวณส่วนหน้าของสตรีมเมอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสตรีมเมอร์มีลักษณะเป็นเส้น - ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโมเดลแบบ 3 มิติจะมีค่าอยู่ตรงกลางระหว่างค่าที่ได้จากโมเดลแบบ 1 มิติและ 1.5 มิติ

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เนื่องจากแกปอากาศมาตรฐานที่นิยมใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติไฟฟ้าแรงสูงมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น แกปแบบระนาบคู่ขนาน แกปทรงกลม แกปแบบอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วม หรือแกปแบบแท่งทรงกระบอก เป็นต้น เพื่อเป็นการจำกัดขอบเขตการวิจัย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขของการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ในแกปทรงกลม ซึ่งเป็นแกปอากาศที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าแบบค่อนข้างสม่ำเสมอทำให้เหมาะกับการศึกษาในขั้นต้น ทำการเปรียบเทียบเชิงวิเคราะห์ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ และเสนอหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ในแกปอากาศที่ความดันบรรยากาศ

1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในแต่ละบทของวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นดังนี้

- บทที่ 2 กล่าวถึง กลไกและทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ในแก๊ส และระบบสมการที่ใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข
- บทที่ 3 กล่าวถึง รายละเอียดของแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งได้แก่ รูปแบบของสมการลักษณะของแกปอากาศ และเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ พร้อมกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีต่าง ๆ
- บทที่ 4 กล่าวถึง การวิเคราะห์ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ การเกิดและการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสดีสชาร์จ และผลของตำแหน่งประจุเริ่มต้นที่มีต่อสตรีมเมอร์
- บทที่ 5 กล่าวถึง รายละเอียดของการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ ผลการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองเชิงตัวเลขกับผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ และหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาการเกิดเบรกดาวน์
- บทที่ 6 กล่าวถึง ข้อสรุปของการวิจัยและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป