1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อนุภาครูปแบบต่างมีบทบาทสำคัญ ในการใช้งานวัสดุฉนวนและการใช้งานทางไฟฟ้าสถิตมากมาย. สำหรับการใช้งานทางไฟฟ้าสถิต อนุภาคถูกใช้ในการเคลือบ การพ่นสี การสร้างภาพ เช่น เครื่องพิมพ์ชนิดแบบเลเซอร์และเครื่องพิมพ์แบบหมึกหยด เป็นต้น ซึ่งในการใช้งานเหล่านี้ อนุภาคมักได้รับการอัดประจุเพื่อให้ควบคุมการเคลื่อนที่ได้อย่างง่าย. เครื่องกำจัดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับภาคการผลิตไฟฟ้า และภาคอุตสาหกรรม ในการควบคุมการปล่อยอนุภาคออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก. ในปัจจุบัน มีความสนในการประยุกต์ใช้งานของไหลเอ็มอาร์ (Megnetorehological fluid) หรือของไหลอีอาร์ (Electrorheological fluid) สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คลัทช์ ตัวรับแรงกระแทก วาล์ว ให้เป็นแบบแอ็กทิฟ. เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้า ที่มีขนาดสูงเพียงพอให้แก่ของไหลเอ็มอาร์ หรือของไหลอีอาร์ ก็จะสามารถปรับให้ของไหลดังกล่าวมีความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นได้. ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงความหนืดที่เกิดขึ้น เป็นผลมาจากการที่อนุภาคภายในของไหล(ซึ่งมีขนาดในช่วงไมโครเมตร) เรียงตัวเป็นเส้นโซ่ หรือรวมตัวเป็นคลัสเตอร์ขึ้นด้วยแรงทางไฟฟ้าหรือแรงทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้น. ดังนั้น ของไหลทั้งสองจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้ในอุปกรณ์ทางไฟฟ้ากลแบบแอคทิฟ.

ในอีกด้านหนึ่ง สำหรับระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (High-voltage insulation systems) การปนเปื้อนอนุภาคเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง. อนุภาคปรากฏอยู่ในระบบฉนวนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น ในน้ำมันฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า ในบุชชิ่งไฟฟ้าแรงสูง. อนุภาคเข้าสู่ระบบฉนวนได้จากการปนเปื้อนในกระบวนการต่างๆ เช่น การผลิต การประกอบ การขนส่ง และการติดตั้งเป็นต้น. อนุภาคสามารถทำให้เกิดผลร้ายแรงต่อระบบฉนวน เนื่องจากธรรมชาติของอนุภาคและการมีอยู่ของสนามไฟฟ้าภายในระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง. อนุภาคตัวนำสามารถรับประจุจากอิเล็กโตรดได้ เมื่อมีการสัมผัสกับอิเล็กโตรด. เมื่อได้รับประจุแล้ว อนุภาคมีแนวโน้มที่จะถูกขับให้เคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโตรดด้วยแรงคูลอมบ์. การเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถทำให้สนามไฟฟ้าในบริเวณโดยรอบสูงขึ้นได้อย่างมาก ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน หรือการเกิดเบรกดาวน์ขึ้นในแนวนหลักได้. อนุภาคฉนวนมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่าอนุภาคตัวนำ. อนุภาคฉนวนจะได้รับแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกหรือแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า. แม้ว่าโดยทั่วไปแล้ว ขนาดของแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก (Dielectrophoretic force, DEP force) มีขนาดต่ำ และสามารถละเลยได้ในกรณีที่แรงคูลอมบ์มีขนาดสูงกว่ามาก ในระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูงสนามไฟฟ้ามีขนาดสูงมาก ทำให้เราต้องพิจารณาผลของแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกที่มีต่ออนุภาคฉนวนด้วย. แรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกมีทิศทางที่จะเคลื่อนอนุภาคเข้าสู่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นตัวประกอบที่ทำให้เกิดดิสชาร์จในระบบฉนวนได้ง่ายขึ้นเช่นเดียวกัน. รูปแบบของอนุภาคอีกแบบหนึ่งที่พบในระบบฉนวนเหลวก็คือ การเกิดฟองอากาศหรือฟองก๊าซอื่นๆ ภายในฉนวนเหลว. โดยปกติแล้ว อากาศหรือก๊าซมีสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำกว่าฉนวนเหลวที่อยู่ล้อมรอบ. ดังนั้น สนามไฟฟ้าภายในฟองอากาศหรือฟองก๊าซจะมีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าพื้นหลัง. เนื่องจากความคงทนไดอิเล็กตริกของอากาศต่ำกว่าของฉนวนเหลว สนามไฟฟ้าสูงในฟองก๊าซจึงทำให้เกิดดิสชาร์จขึ้นภายใน. ประจุที่เกิดขึ้นจากดิสชาร์จทำให้ความสามารถในการฉนวนของฉนวนเหลวลดลงต่อไป.

นอกจากรูปแบบของอนุภาคที่ได้กล่าวถึงในที่นี้ การใช้งานอนุภาคที่สำคัญทางไฟฟ้าสถิตอีกประการหนึ่งก็คือ การประยุกต์ใช้งานสนามไฟฟ้ากับเซลล์สิ่งมีชีวิต. เซลล์สิ่งมีชีวิตสามารถพิจารณาเป็นอนุภาคที่ไม่มีการอัดประจุ ประกอบด้วยผิวฉนวนภายนอก(เมมเบรนไขมัน)ห่อหุ้มตัวกลางนำไฟฟ้าภายใน(ไซโตพลาสซึม). พฤติกรรมทางไฟฟ้ากลของเซลล์สิ่งมีชีวิตมีความซับซ้อนสูง และมักขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ. แม้ว่าการศึกษากลศาสตร์ไฟฟ้าของเซลล์จะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับระบบฉนวน แต่พื้นฐานที่ได้สามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในวงกว้างได้ต่อไป.

ดังที่ได้กล่าวมา เราเห็นได้ว่าอนุภาคมีการใช้งานหรือมีผลต่อการใช้งานทางปฏิบัติในรูปแบบต่างๆ ความรู้พื้นฐานทางกลศาสตร์ไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ ในการควบคุมพฤติกรรมของอนุภาค ให้เกิดประโยชน์หรือไม่ก่อโทษต่อสมรรถนะตามลักษณะการใช้งาน. มีการควบคุมทางกลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคในรูปแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับงานที่ใช้. ตัวอย่างเช่น การใช้ประจุ(เนื่องจากการเสียดสีหรือจากโคโรนาดิสชาร์จ) เพื่อดึงอนุภาคเข้าหาหรือผลักให้ออกจากวัสดุอื่น การยึดอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุให้ยึดกับวัตถุ ณ ตำแหน่งที่ต้องการ หรือการส่งอนุภาคจากพื้นผิวหนึ่งไปสู่อีกพื้นผิวหนึ่ง. แม้ว่าการจัดการอนุภาคเหล่านี้ไม่สามารถกระทำได้โดยใช้การกระตุ้นการเคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว สนามไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอนุภาคที่มีขนาดในระดับไมโครมเตร เนื่องจากแรงทางไฟฟ้ามักจะมีขนาดที่มากกว่าแรงชนิดอื่นๆ เช่น แรงแม่เหล็ก หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force).

โครงการวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ไฟฟ้า รวมถึงการอัดประจุอนุภาค โดยมีวัตถุประสงค์ในการควบคุมพฤติกรรมของอนุภาคในแง่ต่างๆ. ปัจจุบัน มีความพยายามที่จะลดขนาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าสถิตอย่างต่อเนื่อง. ระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูงหรือสวิตช์เกียร์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีขนาดเล็กลงก็เป็นที่ต้องการ เพื่อใช้ในบริเวณชุมชนเมือง หรือเพื่อลดปริมาณการใช้ก๊าซ SF6 ที่เป็นฉนวนหลักในสวิตช์เกียร์แบบฉนวนด้วยก๊าซ เนื่องจากเป็นก๊าซเรือนกระจกชนิดหนึ่ง. แนวโน้มการลดขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าว ทำให้การควบคุมอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น เพราะช่องว่างสำหรับการควบคุมอนุภาคมีขนาดลดลง และสนามไฟฟ้าพื้นหลังที่เกิดขึ้นในระบบมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง. ดังนั้น โครงการวิจัยนี้มีโฟกัสหลักอยู่ที่อนุภาคในระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งการใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมมีข้อจำกัดด้วยเงื่อนไขการอัดประจุ การเกิดดิสชาร์จ และรูปร่างอิเล็กโตรดซึ่งต้องเหมาะสม. นอกจากนี้ แม้ว่าพฤติกรรมของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าได้ถูกศึกษาในงานวิจัยมากมายจนถึงปัจจุบัน มีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่พิจารณาอนุภาคลักษณะไม่เป็นทรงกลม ทั้งที่เป็นลักษณะของอนุภาคที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ. ทั้งนี้ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบนอนุภาครูปร่างไม่เป็นทรงกลมให้มีความแม่นยำสูงทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ารูปแบบการจัดเรียงที่เกี่ยวข้องเป็นแบบสามมิติโดยสมบูรณ์ (ไม่สามารถใช้ลักษณะการสมมาตรมาลดมิติของปัญหาในการวิเคราะห์ได้). ตัวอย่างความซับซ้อนของการเคลื่อนที่อนุภาคที่พบในทางปฏิบัติได้แก่ พฤติกรรมของอนุภาครูปแท่งปลายแหลมภายใต้สนามไฟฟ้าที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ทางทฤษฎีอย่างชัดเจน. เนื่องจากการมีอยู่ของอนุภาคลดความคงทนไดอิเล็กตริกของระบบโดยรวม การควบคุมอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเทคนิคการยึดจับอนุภาค จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งยวดที่จะปรับปรุงให้ระบบฉนวนมีความสามารถการฉนวนได้ดีขึ้น.

คณะผู้วิจัยคาดว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับระบบฉนวน. นอกจากนี้ องค์ความรู้พื้นฐานที่ได้จากวิเคราะห์และการทดลองในโครงการ ยังอาจมีประโยชน์ต่อการใช้งานทางไฟฟ้าสถิตประเภทอื่น โดยไม่จำกัดเฉพาะการยึดจับอนุภาคเท่านั้น.