



ของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอลและการประยุกต์ใช้ Electro-rheological fluid and its applications

สุนมมาลย์ เนียมกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: tanggggo@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอคำนิยาม กลไกการทำงาน และการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมรูปแบบต่างๆ ของของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอล (Electro-rheological fluid, ER Fluid) ของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอล นั้นเป็นของไหลที่สามารถเปลี่ยนแปลงความหนืดได้เมื่อมีการกระตุ้นจากกระแสไฟฟ้าภายนอก ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ของไหลชนิดนี้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เนื่องจากสามารถควบคุมความหนืดได้ด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้า โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลชนิดนี้คือ การเหนี่ยวนำจากกระแสไฟฟ้าภายนอกทำให้อนุภาคในของไหลเกิดสภาวะไดโพลขึ้น และทำพันธะทางไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืด เมื่อหยุดการเหนี่ยวนำของไหลเหล่านี้จะกลับมามีความหนืดเดิม โดยปัจจุบันเริ่มมีการนำเทคโนโลยีของไหลนี้ไปประยุกต์ใช้ใน ระบบคลัทช์ หรือการยกยานหนักขึ้นด้วยการใช้ไฟฟ้าควบคุมแทนระบบไฮดรอลิก คำหลัก ของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอล, การเหนี่ยวนำจากไฟฟ้า, พันธะไดโพล-ไดโพล

1. บทนำ

บทความวิชาการนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอล (Electro-rheological fluid, ER Fluid) ซึ่งเป็นระบบของไหลฉลาดที่สามารถรองรับความต้องการของเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูงได้ โดยปัจจุบันความแม่นยำของเครื่องจักรกลอุตสาหกรรมนั้นมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความต้องการของวัสดุฉลาดจึงเพิ่มมากขึ้นด้วยเพื่อลดความผิดพลาดในการผลิต

วัสดุฉลาด (Intelligent materials) หรือบางครั้งเรียก วัสดุสมาร์ต (Smart materials) คือ วัสดุที่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่มันทำงานอยู่ และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นตามรูปแบบที่มีการกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าเหมือนพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ เซนเซอร์ (Sensor) และแอคทูเอเตอร์ (Actuator) โดยเซนเซอร์นั้นจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติซึ่งสามารถวัดได้เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงหรือได้รับแรงกระตุ้นจากภายนอก ส่วนแอคทูเอเตอร์นั้นจะตอบสนองและปรับเปลี่ยนรูปร่าง ตำแหน่ง ความถี่ธรรมชาติหรือลักษณะเฉพาะทางกลอื่นๆ เพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลง

ของอุณหภูมิ สนามไฟฟ้า และหรือสนามแม่เหล็ก [1] โดยของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอลนี้เป็นวัสดุฉลาดประเภทแอคทูเอเตอร์ คือมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้มีการประยุกต์ใช้การเปลี่ยนแปลงนี้ในระบบคลัทช์ เบรก ตัวรับแรงกระแทก (Shock absorber) การยกยานหนัก หรือเป็นแขนจักรกลอุตสาหกรรม ในบทความวิชาการนี้จะทบทวนกลไกการทำงาน ตัวแปรที่ศึกษาเพื่อพัฒนาการทำงาน ข้อจำกัดของของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอลเหล่านี้เมื่อมีการนำมาประยุกต์ใช้ นอกจากนั้นยังแสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอลต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางและข้อมูลในการวิจัยและพัฒนาระบบของไหลนี้ต่อไป

2. ของไหลอิเล็กโตรรีโอลลอจิคอล (Electro-rheological fluid, ER Fluid)

คำนิยามของไหลรีโอลลอจิคอล คือ ของไหลซึ่งเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและมีอนุภาคที่สามารถพอลาไรซ์ได้แขวนลอยอยู่ โดยของไหลชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลเมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก [2]

โดยปกติเมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้า อนุภาคที่สามารถพอลาไรซ์ได้จะพอลาไรซ์ทำให้เกิดสภาวะไดโพลขึ้น ซึ่งในระบบที่มีอนุภาคมากกว่าหนึ่งอนุภาค จะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของอนุภาค 3 ชนิด [3] คือ

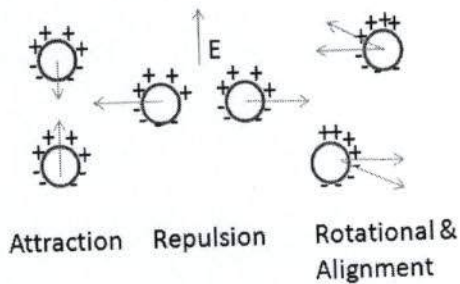
1. การผลัก (Repulsion) เมื่อทิศทางขั้วไฟฟ้าของอนุภาคเหมือนกันจะเกิดการผลักกันระหว่างอนุภาค
2. การดูด (Attraction) เมื่อทิศทางขั้วไฟฟ้าตรงกันข้ามจะเกิดดูดกันระหว่างสองอนุภาค

3. การหมุนและการจัดเรียงตัว (Rotational and Alignment) เมื่อมีการกระตุ้นและเหนี่ยวนำจากอนุภาคข้างเคียงทำให้เกิดการหมุนและการจัดเรียงตัวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 1

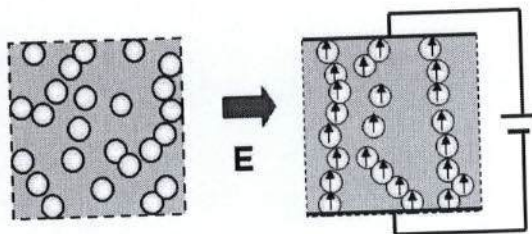
จากกลไกนี้เองในระบบของไหลที่มีการนำอนุภาคที่สามารถพอลาไรซ์ได้มาผสมกับของไหลซึ่งเป็นฉนวน เช่น น้ำมันซิลิโคน เมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก อนุภาคเกิดการพอลาไรซ์เกิดสภาวะไดโพลขึ้น และเกิดปฏิกิริยาทั้งสามชนิดนี้ขึ้น ทำให้เกิดการต่อกันคล้ายสายโซ่เส้นใยของไหล (Fibril like chain) [3] ซึ่งต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ของไหลชนิดนี้ไหล ดังนั้นความหนืดของของไหลจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็วในระดับ



วินาที [4] ดังแสดงกลไกการเกิดการต่อสายโซ่เส้นใยในของไหลในรูปที่ 2 ทิศทางการจัดเรียงตัวของอนุภาคนั้นจะเป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นกับระบบของไหล [3]



รูปที่ 1 ปฏิกริยาของอนุภาคเมื่อการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก [3]



รูปที่ 2 จำลองการเกิดสายโซ่คล้ายเส้นใยในระบบของไหลอิเล็กโตรโอสตอสติกเมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก [4]

โดยทั่วไปอนุภาคที่แขวนลอยในของไหลชนิดนี้จะเป็นอนุภาคที่เมื่อมีการเหนี่ยวนำแล้วเกิดสภาวะไดโพล เช่น โลหะออกไซด์ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า: พอลิอะนิลีน [4] พอลิไพโร [5] พอลิพีนิลีน [6] และของไหลที่เป็นเมทริกซ์นั้นจะเป็นของไหลที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ หรือเป็นฉนวนนั่นเอง เช่น ระบบอนุภาคพอลิอะนิลีนแขวนลอยในยางซิลิโคน [4]

3. การควบคุมของไหลอิเล็กโตรโอสตอสติก

การควบคุมของไหลอิเล็กโตรโอสตอสติกนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ระบบของไหลนี้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องความแม่นยำ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในของไหลสามารถมีปฏิสัมพันธ์กันและกันทำให้เกิดการต่อกันของอนุภาคเป็นสายโซ่คล้ายเส้นใยในของไหล ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดเหวี่ยงระบบของไหลนี้ ดังนั้นความหนืดของระบบจึงสูงขึ้น

ในระบบที่มีความแตกต่างระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่แขวนลอยและของไหลต่อเนื่องสูง เมื่อมีการกระตุ้นด้วย

สนามไฟฟ้าภายนอก จะทำให้ความหนืดของของไหลมีมากกว่าระบบของไหลอิเล็กโตรโอสตอสติกที่มีความแตกต่างระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่แขวนลอยและของไหลน้อยกว่า [7] ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Maxwell-Wagner (polarization type) [8] โดยค่าความแรงของสภาวะไดโพลที่เกิดขึ้น, p ของอนุภาคที่มีรัศมี, a คือ

$$p = \frac{\pi}{2} \epsilon_s a^3 \left(\frac{\sigma_p - \sigma_s}{\sigma_p + 2\sigma_s} \right) E_0 = \frac{\pi}{2} \epsilon_s a^3 \beta E_0 \quad (1)$$

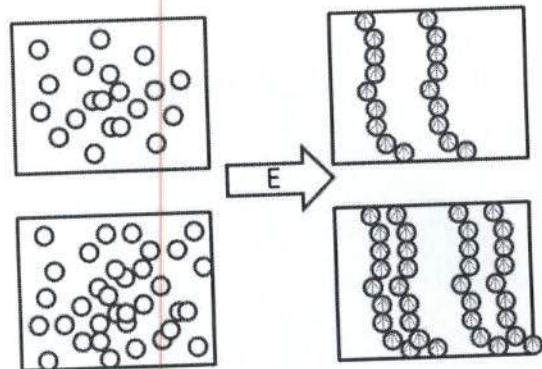
เมื่อ E_0 คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเหนี่ยวนำ

σ_p คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคแขวนลอย

σ_s คือ ค่าการนำไฟฟ้าของของไหลเมทริกซ์

ϵ_s คือ ค่าไดอิเล็กทริกของของไหลเมทริกซ์

เมื่อปริมาณของอนุภาคแขวนลอยเพิ่มมากขึ้นความหนืดที่เกิดขึ้นในระบบของไหลก็มากขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่ความต่างศักย์เท่ากัน [10] เนื่องจากปริมาณอนุภาคที่มากกว่าสามารถสร้างเส้นใยสายโซ่มากกว่าระบบที่มีปริมาณอนุภาคน้อยกว่า ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นมากเมื่อมีการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 จำลองกลไกของปริมาณอนุภาคต่อการเกิดสายโซ่ในระบบของไหลเมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก

ทำนองเดียวกันในระบบที่ปริมาณอนุภาคเท่ากัน เมื่อความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ความหนืดที่เพิ่มขึ้นของระบบของไหลก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นสามารถพอลาไรซ์อนุภาคให้อยู่ในสภาวะไดโพลสูงกว่า แรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคจึงมากกว่าสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ต่ำกว่า [9]

อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือความหนืดของของไหลเมทริกซ์ เมื่อความหนืดของของไหลเพิ่มมากขึ้น ความหนืดที่เกิดขึ้นก็มากขึ้นด้วย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเมื่อมีการเหนี่ยวนำโดยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก จะเกิดสายโซ่ของอนุภาคแขวนลอยขึ้นในระบบของไหล ทำให้ถ้าต้องการบิดหรือทำลายโครงสร้างของไหลต้องใช้แรงเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ดังนั้น



เมื่อมีการเพิ่มความหนืดของระบบของไหล แรงที่ต้องใช้ในการบิดหรือทำลายโครงสร้างระบบของไหลนี้จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดแรงทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคและแรงไฮโดรไดนามิกของของไหลส่งเสริมกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ 2 เมื่อสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำอนุภาคแขวนลอยซึ่งมีรัศมี a ต้องใช้ค่าแรง (F) ที่ต้องการในการเฉือนระบบของไหลที่ถูกบิดแบบกลับปัดกลับมา (Oscillatory Shear) ด้วยความถี่ ω เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงที่ต้องใช้ในการเฉือนแปรผันตรงตามความหนืดของของไหลเมทริกซ์

$$F_{\text{shear}} = 6\pi\omega\gamma_0\eta a^2 \quad (2)$$

เมื่อ γ_0 คือ ความเครียดสูงสุดที่ระบบของไหลสามารถบิดได้ก่อนโครงสร้างสายโซ่จะถูกทำลาย และ η คือ ความหนืดของของไหลเมทริกซ์ [3]

สรุปการควบคุมการเปลี่ยนแปลงความหนืด หรือความเค้นของระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกนั้น ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่แขวนลอยและของไหล ปริมาณและขนาดของอนุภาคที่แขวนลอย อุณหภูมิของของไหล ความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนืดของของไหล

โดยทั่วไปเมื่อหยุดการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลจะกลับสู่ความหนืดเดิม แต่ระบบของไหลบางระบบเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกของไหลเมทริกซ์ถูกกระตุ้นและเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดพันธะเคมีเกิดโครงสร้างตาข่ายในระบบของไหล ทำให้ความหนืดไม่สามารถกลับสู่ค่าเดิมได้ [4] เช่น ในระบบพอลิเอนิลีนแขวนลอยในน้ำมันซิลิโคน โดยเมื่อมีการเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงมากพอ สายโซ่ของซิลิโคนถูกทำลายทำให้เกิดปลายสายโซ่ซึ่งมีความว่องไวทางเคมีสูง (Free radical) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่ายในน้ำมันซิลิโคน เมื่อมีการหยุดการเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ความหนืดของของไหลจึงไม่สามารถกลับสู่ค่าแรกเริ่มได้ เนื่องจากมีโครงสร้างบางส่วนได้เปลี่ยนแปลงไป [4]

นอกจากนี้เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลได้ เช่น การเติมสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีขั้ว Span80 ลงในระบบพอลิเอนิลีนแขวนลอยในน้ำมันซิลิโคน พบว่าประสิทธิภาพการกระจายตัวของอนุภาคแขวนลอย และแรงที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าภายนอกนั้นเพิ่มมากขึ้นกว่าระบบที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว ที่ปริมาณอนุภาคแขวนลอยเท่ากัน

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ ตัวแดมป์ (Dampers) คลัทช์ (Clutches) วาล์ว (Valves) ตัวควบคุมตำแหน่งและความเร็วในหุ่นยนต์ กลไกการทำงานทั้งหมดจะคล้ายคลึงกัน คือ เมื่อมีการเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าภายนอก ความหนืดของของไหลจะเปลี่ยนแปลง คือ เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถควบคุมระบบกลไกต่างๆได้

เช่นในการประยุกต์ใช้เป็นตัวแดมป์ ซึ่งมีลูกสูบ (Piston) อยู่ตรงกลาง ด้านบนลูกสูบมีกระบอก (Cylinder) ซึ่งมีของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลถูกบรรจุอยู่ระหว่างกระบอกด้านในและด้านนอก โดยมีอิเล็กโตรดประกบอยู่ด้านบนของกระบอกด้านใน และด้านล่างของกระบอกด้านนอก เมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง จะเกิดการขยับตัวของกระบอกทำให้ลูกสูบขยับทำให้เกิดแรงขึ้น [10]

แต่การใช้ระบบของไหลนี้ก็ยังมีข้อเสียอยู่อีกหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นการเกิดเจลขึ้นในระบบหลังจากหยุดการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง หรือการรั่วของของไหลได้เมื่อรอบการใช้งานสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลเป็นยางอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลเพื่อแก้ปัญหาของไหลรั่วของระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอล ซึ่งระบบยางอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลนั้นหลักการทำงานในการทำงานคล้ายคลึงกับระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอล คือเป็นระบบที่มีอนุภาคที่สามารถพอลาไรซ์ได้เมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก กระจัดตัวอยู่ในเมทริกซ์ซึ่งเป็นอีลาสโตเมอร์ ทำให้ระบบนี้มีการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียดเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก แต่การประยุกต์ใช้ก็เปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน

4. สรุป

บทความวิชาการนี้นำเสนอระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอล ซึ่งเป็นระบบของไหลที่ประกอบด้วยอนุภาคที่สามารถพอลาไรซ์ได้แขวนลอยในของไหลซึ่งมีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก อนุภาคจะเกิดการพอลาไรซ์ได้สภาวะไดโพล อนุภาคจะเกิดปฏิกิริยาซึ่งกันและกันเกิดสายโซ่ของอนุภาคภายในของไหล ทำให้ระบบของไหลต้องการแรงเฉือนมากในการเคลื่อนย้าย ความเค้นของระบบของไหลเพิ่มมากขึ้น โดยปัจจัยที่ควบคุมระบบของไหลนี้ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคและของไหล ปริมาณและขนาดของอนุภาคในระบบของไหล ความหนืดของระบบของไหล และความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าที่กระตุ้น จากคุณสมบัติเหล่านี้ของระบบของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลทำให้มีการประยุกต์ใช้ของไหลในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำและความรวดเร็วในการตอบสนองต่อการเร้าจากภายนอก เช่น คลัทช์ วาล์ว ในหุ่นยนต์หรือในอุตสาหกรรมการผลิตที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เพื่อพัฒนาของไหลนี้สำหรับเป็นวัสดุตลาด จึงจำเป็นต้องพัฒนาและศึกษาวิจัยเพิ่มแก้ปัญหาการเกิดเจลของของไหล และการรั่วของของไหล ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบของไหลนี้ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Debashish R., Jennifer N. C. and Brent S. S., 2010. Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials. Progress in Polymer science;35, 278-321.



- [2] Tao R., Sun J.M., 1991. Three-dimensional structure of induced electrorheological solid. *Physical Review Letter*, 67, 398-401.
- [3] Parthasarathy M., Klingenberg D. J., 1996. Electrorheology: Mechanisms and models *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 17, 57-103.
- [4] Hiamtup P., Sirivat A., Jamieson A. J., 2006. Electrorheological properties of polyaniline suspensions: Field-induced liquid to solid transition and redual gel structure, *Journal of colloid and interface science*, 295, 270-278.
- [5] Goodwin J.W., Markham G. M., Vincent B., 1997. studies on model electro rheological fluids. *Journal of physical chemistry B*, 101, 1961.
- [6] Plochaeski J., Drabik H., Wycislik H., Ciach T., 1997. Electrorheological properties of polyphenylene suspensions, *Journal of colloid and interface science*, 88, 139-145.
- [7] Klingenberg D.J., Swol F.V., Zukoski C.F., 1991, Magnetorheology: Applications and Challenges, *Journal of physical chemistry* 94, 6160.
- [8] Klingenberg D.J., Swol F.V., Zukoski C.F., 1991, Magnetorheology: Applications and Challenges, *Journal of physical chemistry* 94, 6170.
- [9] Marshall L., Zukoski C.F., Goodwin J.W., 1989, Effects of electric fields on the rheology of non-aqueous concentrated suspensions *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1* 85 (1989) 2785.
- [10] Kim J. W., Kim C. A., Choi H. J. Choi S. B., 2006, Role of surfactant on damping performance of polyaniline based electrorheological suspension, *Korea-Australia Rheological Journal*, 18, 25