

## การควบคุมตำแหน่งหยดสารแม่เหล็กเหลวด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการส่งยา

### โดยใช้เนื้อสุกรเป็นตัวอย่างทดสอบ

## Position Control of Ferrofluid Droplets by Electromagnets for Drug Targeting in Porcine Specimens

มีชัย โลหะการ

ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

### บทคัดย่อ

การใช้เคมีบำบัดเพื่อรักษาโรคมะเร็งมีผลข้างเคียงต่อผู้ป่วยในหลายด้าน เช่น ทำให้ผมร่วง เบื่ออาหาร อาเจียน และเนื้อเยื่อบางส่วนถูกทำลาย ดังนั้นการจำกัดขอบเขตการแพร่กระจายของตัวยาจึงมีความสำคัญ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ยาให้น้อยที่สุด แต่ยังคงประสิทธิภาพในการรักษามากที่สุด การควบคุมตำแหน่งยาโดยใช้หยดสารแม่เหล็กเหลว (Ferrofluid) จึงเป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งหยดสารแม่เหล็กเหลวด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการส่งยาโดยใช้เนื้อสุกรเป็นตัวอย่างทดสอบ การทดลองใช้สารแม่เหล็กเหลวแบบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่เป็นอนุภาคนาโน (Nanoparticle) เป็นตัวนำยาถูกควบคุมด้วยสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) จากแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) การทดลองทั้งหมดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) ผลลัพธ์จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมตำแหน่งหยดสารแม่เหล็กเหลวให้เคลื่อนที่ในชั้นเนื้อสุกรที่มีทั้งเนื้อแดงและไขมัน ได้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการสร้างชุดควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในหลอดเลือดจำลอง

**คำสำคัญ :** การส่งยาด้วยแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเหลว แม่เหล็กไฟฟ้า

### Abstract

Side effects of chemotherapy for tumor or cancer treatment are appetite change, hair loss, vomiting and damaged tissue. The region of interest of drug dispersion is an important factor for a medical treatment. Then, the curative process for cancer treatment gradually employs less amount of drug but maintain treatment efficiency to reduce those side effects in the human body. The position control of ferrofluid as magnetic drug is extremely important. In this research, the position control of ferrofluid droplets by electromagnets for drug targeting in porcine specimens is purposed. The experiment use the hydrocarbon nanoparticle ferrofluid as drug carrier. Ferrofluid droplets are controlled by electromagnetic field that is generated from electromagnets. All processes are operated by computer via Graphic User Interface (GUI). Experimental results show that ferrofluid position can be manipulated through porcine samples those comprise with lipid and meat. In future work, a ferrofluid control in the syntactic blood vessel will be studied.

**Keyword:** Magnetic Drug Delivery, Ferrofluid, Electromagnet

## 1. บทนำ (Introduction)

จากข้อมูลทางการแพทย์ยืนยันว่าอัตราการตายอันดับต้นๆ ของประชากรในประเทศไทยมีสาเหตุมาจากโรคมะเร็ง การค้นคว้าวิธีการรักษาทางการแพทย์มีอยู่หลายวิธี อาทิ การรักษาโดยการฉายรังสี [1] [2] ทำการฉายรังสีที่มีความเข้มสูงในการรักษา วิธีรักษาลักษณะนี้อาจมีผลต่อผู้ป่วย กล่าวคือเกิดการแพร่กระจายของยาไปยังอวัยวะส่วนอื่นทั่วร่างกายที่เรียกว่า ผลกระทบข้างเคียง (Side Effect) ทำให้ผู้ป่วยหลายรายพบว่า เป็นหย่อมๆ หรือทั้งหมด รวมถึงอาจมีอาการอาเจียน และเบื่ออาหารร่วมด้วย

เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวการจำกัดขอบเขตการแพร่กระจายของตัวยาและใช้ยาให้น้อยที่สุดแต่ทรงประสิทธิภาพในการรักษามากที่สุดจึงมีความจำเป็น ซึ่งเทคโนโลยีด้านนี้เป็นที่สนใจของนักวิจัยต่างๆ ทั่วโลก วิธีการหนึ่งที่กำลังทำการศึกษาวิจัยกันอยู่คือการใช้ยาที่มีสารแม่เหล็กเหลวเป็นตัวนำยาไปสู่เนื้อเยื่อเป้าหมายและใช้แม่เหล็กจากภายนอกส่งสนามแม่เหล็กมาจำกัดขอบเขตของตัวยานั้นให้มีผลเฉพาะชิ้นส่วนเนื้อเยื่อที่ต้องการ จุดเด่นของวิธีการนี้อยู่ที่สามารถลดปริมาณการให้ยา และมีผลกระทบข้างเคียงน้อย เนื่องจากยาถูกจำกัดขอบเขตให้อยู่เฉพาะบริเวณเซลล์มะเร็ง ด้วยสารแม่เหล็กเหลว ซึ่งการควบคุมตำแหน่งหยุดสารแม่เหล็กเหลวด้วยแม่เหล็กได้มีการศึกษาไว้ดังตัวอย่างต่อไปนี้ งานวิจัย [3] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลวด้วยแม่เหล็กจำนวน 8 การทดลองจากแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถใช้ควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลวได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้รายงานการทดลองจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดลองควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลวขนาดเล็ก (ประมาณ 0.5  $\mu\text{L}$ ) ที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ [4] ได้ถูกรายงานในปี พ.ศ.2559 งานวิจัยนี้ได้สร้างแม่เหล็กไฟฟ้าจากแผ่นทองแดง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมให้หยุดสารแม่เหล็กเหลวขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้ แต่แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแผ่นทองแดงซึ่งมีสายเส้นเล็กเกิดความร้อนได้ง่าย ดังนั้นทำให้สร้างสนามแม่เหล็กได้น้อย จึงเป็นไปได้ยากที่จะ

ควบคุมสารแม่เหล็กเหลวที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งยังไม่มีรายงานในการทดลองกับเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต

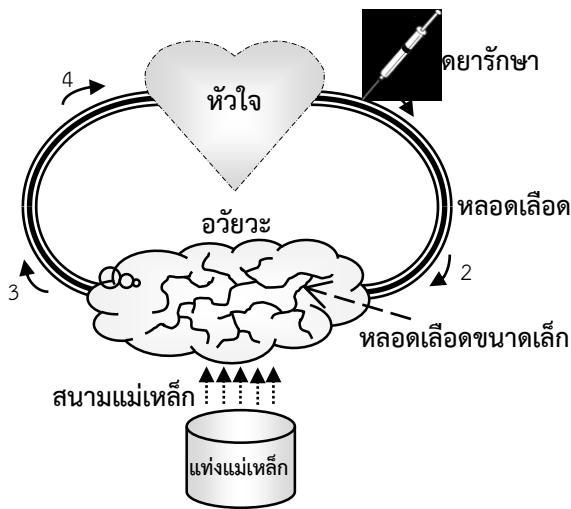
คณะผู้วิจัยจาก University of Maryland [5] ได้สร้างแบบจำลองและการทดลองควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลวในงานทดลองด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน ตัว ใช้กล้องที่อยู่ 4 ด้านบนในการตรวจจับตำแหน่งเพื่อส่งข้อมูลตำแหน่งให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลและควบคุมแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด ในแบบจำลองได้อธิบายถึงสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งหยุดสารแม่เหล็กเหลว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลวให้เคลื่อนที่บนผิวน้ำในงานทดลองเป็นลายเส้นแบบต่างๆ ได้ แต่งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ทดลองกับเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต อีกทั้งยังไม่ได้กล่าวถึงปัจจัยของเนื้อเยื่อในการควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลว

การทดลองควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลวในท่อทรงกระบอก [6] ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15 เซนติเมตร สูง 8 เซนติเมตร ทรงกระบอกด้านในประกอบไปด้วยขดลวดที่พันรอบตัวถังที่เจาะรูไว้เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในการควบคุมหยุดสารแม่เหล็กให้อยู่ในพื้นที่ทำงาน (Working Area) ที่กำหนด งานวิจัยนี้ได้รายงานความสัมพันธ์ของกระแสขนาด 20 A ถึง 50 A กับแรงในตำแหน่งบริเวณพื้นที่ทำงานเทียบกับเวลาในการใช้งาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการควบคุมหยุดสารแม่เหล็กเหลวในพื้นที่ขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทดลองจริงกับสารแม่เหล็กเหลว และยังไม่มีการรายงานในการทดลองระหว่างสารแม่เหล็กเหลวกับเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการควบคุมตำแหน่งหยุดสารแม่เหล็กเหลวด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการส่งยาโดยใช้เนื้อเยื่อเป็นตัวอย่งทดสอบ วิธีการในลักษณะนี้จำเป็นต้องใช้หลักการของกลศาสตร์ของไหล สนามแม่เหล็ก และโดยการควบคุมตำแหน่งของสารแม่เหล็กเหลวกระทำด้วยคอมพิวเตอร์ และไม่คอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) หากทำได้สำเร็จจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องมือทางการแพทย์ โดยเป็นไปตามนโยบายโมเดลไทยแลนด์ 4.0 ในกลุ่มสาธารณสุข สุขภาพ และเทคโนโลยีทาง การแพทย์ (Health, Wellness and Bio-Med) [7]

## 2. การส่งยาด้วยสารแม่เหล็กเหลว (Magnetic Drug Targeting)

การส่งยาในหลอดเลือดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 1 เมื่อแพทย์ฉีดยารักษามะเร็งที่มีสารแม่เหล็กเหลวเคลือบอยู่เข้าสู่กระแสเลือด เมื่อตัวยาเข้าสู่หัวใจซึ่งทำหน้าที่เหมือนปั๊มน้ำสูบน้ำเลือด และยารักษามะเร็งผสมอยู่ผ่านหลอดเลือดตามลูกศรไปยังตำแหน่งที่ 1 ผ่านไปยังตำแหน่งที่ 2 เข้าสู่อวัยวะที่เป็นมะเร็ง เช่น ตับ ตัวยาคูกส่งต่อไปยังเส้นเลือดฝอยที่มีขนาดเล็กไหลวนอยู่เฉพาะในอวัยวะนั้น เพราะมีแท่งแม่เหล็กซึ่งส่งสนามแม่เหล็กไปกระทำต่อยาซึ่งมีสารแม่เหล็ก นั่นคือตัวยาจะถูกแม่เหล็กดูดไว้ เลือดส่วนใหญ่ที่ไม่มีตัวยาจะไหลออกจากอวัยวะผ่านหลอดเลือดใหญ่เข้าสู่ตำแหน่งที่ 3 และผ่านตำแหน่งที่ 4 เพื่อเข้าสู่หัวใจ หมุนวนเป็นวัฏจักรทำให้ตัวยาส่วนใหญ่ไม่แพร่กระจายไปยังอวัยวะอื่น เป็นการลดผลข้างเคียงจากการใช้ยารักษามะเร็ง โดยสามารถลดปริมาณยา และยังคงประสิทธิภาพในการรักษาได้



ภาพที่ 1 แบบจำลองการส่งยาในหลอดเลือดในร่างกายมนุษย์

สารแม่เหล็กเหลวมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติความเป็นแม่เหล็กแตกต่างกัน [8] โดยทั่วไปขนาดจะอยู่ในช่วง 100 นาโนเมตร อนุภาคแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้อย่างรวดเร็วและไม่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนที่อุณหภูมิร่างกายจึงไม่ก่อให้เกิดการอุดตันในหลอดเลือด

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ สารแม่เหล็กเหลวแบบเฟอร์ริ (Ferrimagnetism) เนื่องจากมีความไวต่อสภาพแม่เหล็ก ( $\chi$ ) สูง มีสูตรทางเคมีคือ  $Fe_3O_4$  มีขนาดประมาณ 120 นาโนเมตร

## 3. แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet)

ในการควบคุมสารแม่เหล็กเหลวทำได้โดยใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) หรือแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพราะต้องการควบคุมความแรงของการดูดได้ด้วยกระแสไฟฟ้าผ่านคอมพิวเตอร์ ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่มีส่วนของการเคลื่อนที่ทางกลทำให้ไม่มีการสั่นของโครงสร้างส่งผลให้สามารถควบคุมตำแหน่งสารแม่เหล็กเหลวในจานทดลอง (Petri Dish) ได้ง่ายและแม่นยำมากขึ้น

จากการทดลองหลายครั้งด้วยแกนหลายประเภท งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุแกนเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร มีความยาว 7.5 เซนติเมตร ใช้ลวดทองแดงขนาดเบอร์ 26 พันรอบแกนเหล็กดังกล่าวจำนวน 500 รอบ ดังแสดงในภาพที่ 2 มีกระแสใช้งานที่ 8 แอมป์แปร์ เมื่อใช้เกาส์มิเตอร์ (Gaussmeter) รุ่น HT201 วัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density: B) ด้านบนของแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 161 มิลลิเทสลา



ภาพที่ 2 แม่เหล็กไฟฟ้าและเกาส์มิเตอร์

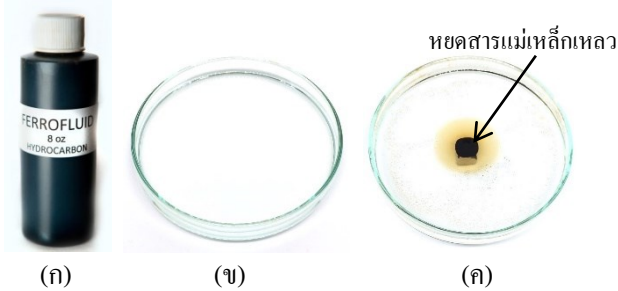
ทำการทดลองแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มเติมดังตารางที่ 1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อสนามแม่เหล็กผ่านจานทดลองแก้ว และชั้นเนื้อที่มีจำนวนชั้นมากขึ้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจากเกาส์มิเตอร์

ลักษณะการวัด	B (mT)
1. ด้านบนแม่เหล็กไฟฟ้า	161.0
2. มีจานทดลอง	92.5
3. จานทดลองและชั้นเนื้อสุกร 1 ชั้น (0.15 mm)	52.7
4. จานทดลองและชั้นเนื้อสุกร 2 ชั้น (0.30 mm)	18.3
5. จานทดลองและชั้นเนื้อสุกร 3 ชั้น (0.45 mm)	16.4

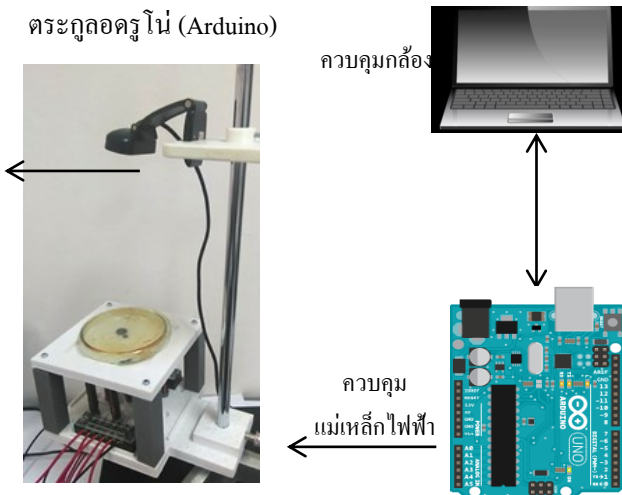
## 4. การทดลองและผลการทดลอง (Experiment and Result)

การทดลองเลือกใช้สารแม่เหล็กเหลวแบบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กมากระดับนาโนเมตร (Nanoparticle) ดังแสดงภาพที่ 3 (ก) นอกจากนี้ได้เลือกจานทดลองแก้ว (Petri Dish) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตรดังภาพที่ 3 (ข) หยดสารแม่เหล็กเหลวมีปริมาตรประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพที่ 3 (ค)



ภาพที่ 3 สารแม่เหล็กเหลวและจานทดลองแก้ว

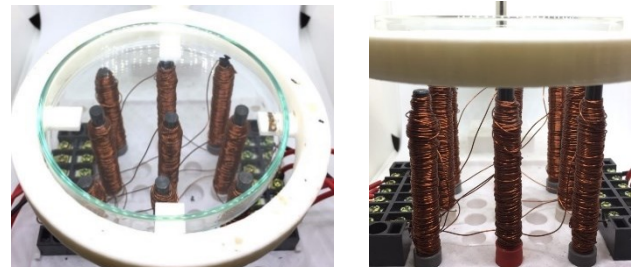
โครงสร้างและการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 4 ตัวจับยึดกลิ้งและแท่นยึดแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกออกแบบขึ้นมาเฉพาะด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printer) มีโครงสร้างเป็นพลาสติกแข็งแรงทนทานและสามารถปรับระดับได้ นอกจากนี้ยังมีแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน 9 แท่ง วางอยู่ด้านล่างซึ่งแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ตระกูลอาดูโน่ (Arduino)



ภาพที่ 4 โครงสร้างและการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลอง

ส่วนที่สำคัญในการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวคือแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีการจัดเรียงให้กระจายทั่วทั้งจานทดลองแก้วจำนวน 9 จุด ดังภาพที่ 5 (ก) ทั้งนี้พลาสติกที่ใช้ในการวางจานทดลองได้ถูกออกแบบขึ้นมาเฉพาะด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งการยึดและเชื่อมต่อ (Terminal) ด้านล่างแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 5

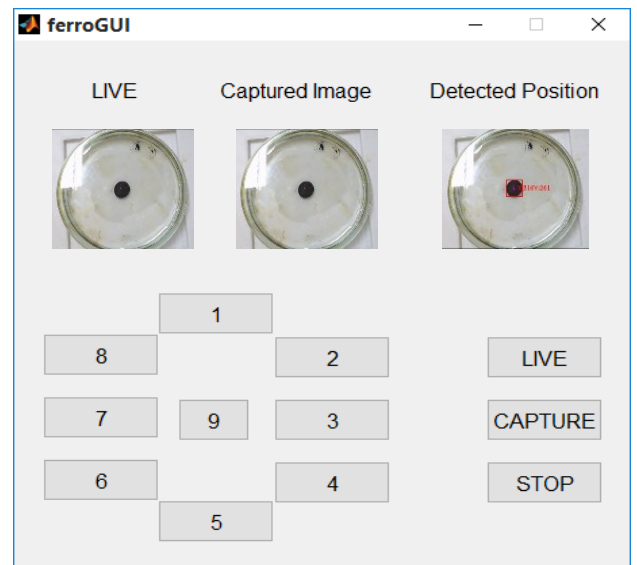
(ข) ทั้งนี้การควบคุมแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายกระแสไฟฟ้า 8A ป้อนเข้าสู่แท่งแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่ 161 mT



(ก) (ข)

ภาพที่ 5 การจัดวางแม่เหล็กไฟฟ้า

ส่วนติดต่อผู้ใช้ (Graphic User Interface) เพื่อใช้ในการสั่งการควบคุมแม่เหล็กแสดงในภาพที่ 6 ประกอบด้วยปุ่มการแสดงผลภาพสด (LIVE) ปุ่มจับภาพ (Capture) เพื่อใช้จับภาพในการคำนวณ (Captured Image) ผลลัพธ์จากการคำนวณแสดงด้วยคู่ลำดับ xy ในภาพตรวจจับตำแหน่ง (Detected Position) และมี 9 ปุ่มเพื่อใช้ควบคุมแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์

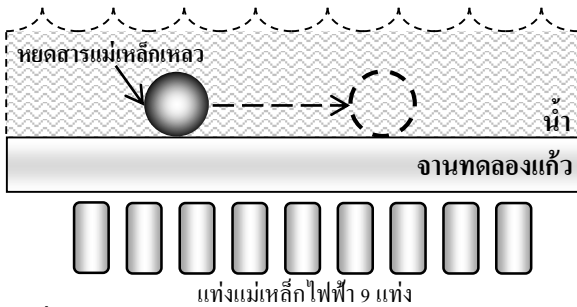


ภาพที่ 6 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (GUI)

#### 4.1 การควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในงานทดลอง

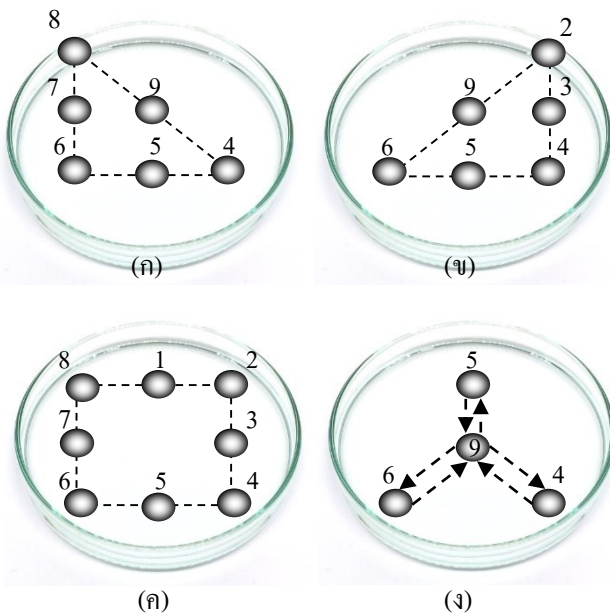
การทดลองส่วนแรกเป็นการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในงานทดลองแก้ว การทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นก่อนนำไปใช้กับชิ้นเนื้อสุกรดังแสดงในภาพที่ 7 มีแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน 9 แท่งอยู่ด้านล่างส่งสนามแม่เหล็กผ่าน

งานทดลองแก้วมายังหยดสารแม่เหล็กเหลวที่จมอยู่ในน้ำให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ในภาคนทดลองแก้ว



ภาพที่ 7 การทดลองควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในจานทดลอง

ผลการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในจานทดลองแก้วแสดงในภาพที่ 8 โดย (ก) บังคับให้หยดสารแม่เหล็กเหลวเคลื่อนที่ตามตำแหน่งสามเหลี่ยมมุมฉากตามการจัดวางตำแหน่งของแม่เหล็กไฟฟ้า 9-4-5-6-7-8 (ข) เคลื่อนที่ตามตำแหน่งสามเหลี่ยมมุมฉาก 9-2-3-4-5-6-9 (ค) เคลื่อนที่ตำแหน่งขอบจานทดลอง 1-2-3-4-5-6-7-8 และ (ง) เคลื่อนที่สลับไปมาโดยผ่านแท่งแม่เหล็กตำแหน่งกลาง 9-5-9-6-9-4-9

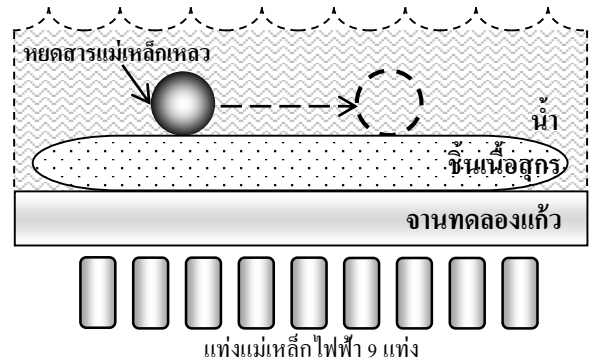


ภาพที่ 8 ผลการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในรูปแบบต่าง ๆ

#### 4.2 การควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวโดยใช้เนื้อสุกร

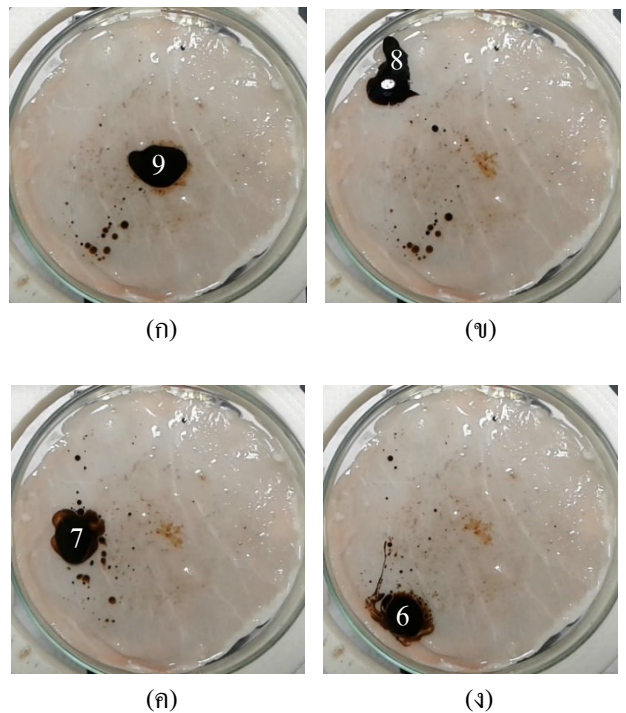
การทดลองนี้เป็นการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวโดยใช้เนื้อสุกรดังแสดงในภาพที่ 9 มีแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน 9 แท่งอยู่ด้านล่างส่งสนามแม่เหล็กผ่านจานทดลองแก้วผ่านชั้นเนื้อสุกรมายังหยดสารแม่เหล็กเหลวที่มีปริมาตรประมาณ

1 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยชั้นเนื้อสุกรและหยดสารแม่เหล็กเหลวจมอยู่ในน้ำ ชั้นเนื้อสุกรจากบริษัทเอส-เพียว (S-Pure) ส่วนสั้นมีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร



ภาพที่ 9 การทดลองควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวโดยใช้เนื้อสุกร

ผลการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวโดยใช้ชั้นเนื้อสุกรดังแสดงในภาพที่ 10 โดย (ก) ถึง (ง) เป็นการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งของแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 10 ผลการควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวโดยใช้ชั้นเนื้อสุกร

การควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวลักษณะนี้ใกล้เคียงกับการส่งยาด้วยแม่เหล็กในเนื้อเยื่อซึ่งการเคลื่อนของหยดสารแม่เหล็กเหลวทำได้ยากกว่าเนื่องจากสนามแม่เหล็กถูกลดทอน (Attenuation) จากการทะลุผ่านชั้นเนื้อ นอกจากนี้ผิวที่ไม่เรียบ

เหมือนจานทดลองแก้วมีทั้งเนื้อแดงและไขมันจึงเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของหยดสารแม่เหล็กเหลวให้ช้าลงเช่นกัน

ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยควบคุมให้หยดสารแม่เหล็กเหลวเคลื่อนที่บนชั้นเนื้อสุกรแต่ละชนิดที่มีตัวกลางที่เป็นน้ำและไม่มีน้ำผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2 หยดสารแม่เหล็กเหลวเคลื่อนที่ได้ดีในน้ำสำหรับแผ่นเบโลน่าและสะโพก แต่เคลื่อนที่ได้ช้าในสันคอและเบคอนเนื่องจากลักษณะพื้นผิวขรุขระจากไขมันและเนื้อแดง

ตารางที่ 2 การเคลื่อนที่ของหยดสารแม่เหล็กเหลวกับชั้นเนื้อแต่ละชนิด

ชนิดของชั้นเนื้อ	การเคลื่อนที่เมื่อมีน้ำ	การเคลื่อนที่เมื่อไม่มีน้ำ
แผ่นเบโลน่า	เคลื่อนที่ได้ดี	ซึมและทะลุผ่าน
สะโพก	เคลื่อนที่ได้ดี	ซึมและทะลุผ่าน
สันคอ	เคลื่อนที่ได้ช้า	ซึมและทะลุผ่าน
เบคอน	เคลื่อนที่ได้ช้า	ซึมและทะลุผ่าน

การเคลื่อนที่ของหยดสารแม่เหล็กเหลวในกรณีที่ไม่มีน้ำเป็นตัวกลางทำได้โดยให้หยดสารแม่เหล็กเหลวเคลื่อนที่ผ่านชั้นเนื้อโดยตรง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหยดสารแม่เหล็กเหลวซึมทะลุผ่านชั้นเนื้อสุกรเมื่อได้รับแรงดูดจากแม่เหล็กไฟฟ้าในภาพที่ 11 (ก) แสดงชั้นเนื้อสุกรก่อนการทดลอง และ (ข) แสดงสารแม่เหล็กเหลวซึมทะลุผ่านชั้นเนื้อสุกรและทิ้งคราบการเคลื่อนที่ไว้ในชั้นเนื้อ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 การเคลื่อนที่ของหยดสารแม่เหล็กเหลวโดยไม่มีน้ำ

## 5. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในชั้นเนื้อสุกรด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องนำส่งยาด้วยแม่เหล็กในการรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวได้ให้เคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดี

จากผลการทดลองสามารถพัฒนางานวิจัยเพื่อควบคุมหยดสารแม่เหล็กเหลวในหลอดเลือดจำลองต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgment)

ขอขอบคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2561 นอกจากนี้ขอบคุณนายโกศล สิทธิ (นิว) และนายไอยเรศ กิจจาชาญชัยกุล (เป๊ก) นักศึกษาภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้าที่คอยช่วยเหลือในส่วนการทดลองอย่างดีเสมอมา

## 6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] S. Senan, D. De Ruyscher, P. Giraud, R. Mirimanoff, and V. Budach, "Literature-based recommendations for treatment planning and execution in high-dose radiotherapy for lung cancer," *Radiother. Oncol.*, vol. 71, no. 2, pp. 139–146, 2004.
- [2] Y. K. Lee *et al.*, "Radiotherapy treatment planning of prostate cancer using magnetic resonance imaging alone," *Radiother. Oncol.*, vol. 66, no. 2, pp. 203–216, 2003.
- [3] B. Shapiro, "Towards dynamic control of magnetic fields to focus magnetic carriers to targets deep inside the body," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 10, pp. 1594–1599, May 2009.
- [4] D. Chakrabarty, S. Dutta, N. Chakraborty, and R. Ganguly, "Magnetically actuated transport of ferrofluid droplets over micro-coil array on a digital microfluidic platform," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 236, pp. 367–377, 2016.
- [5] R. Probst, J. Lin, A. Komace, A. Nacey, Z. Cummins, and B. Shapiro, "Planar steering of a single ferrofluid drop by optimal minimum power dynamic feedback control of four electromagnets at a distance," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 323, no. 7, pp. 885–896, Apr. 2011.
- [6] R. L. Lin, S. F. Hsiao, J. C. Liu, C. H. Luo, T. W. Chang, and M. D. Shieh, "Interpole-Type Magnetic Navigation



System for Actuation of Magnetic Drug,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1. pp. 252–262, 2016.

- [7] สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, “[https://ict.moph.go.th/upload\\_file/files/f458b9e53681c00be9b974f6f22e8f76.pdf](https://ict.moph.go.th/upload_file/files/f458b9e53681c00be9b974f6f22e8f76.pdf).”
- [8] วีระพงษ์ พวงมะลิ, *นาโนฟิสิกส์ NANOPHYSICS*. ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2014.