



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พลศาสตร์ของคลื่นการกระตุ้นสามมิติที่ถูกตรึงบางส่วนกับสิ่งกีดขวาง
ในตัวกลางเคมีกระตุ้นได้

โดย

ผศ. ดร. ชัยยะ เหลืองวิริยะ

กรกฎาคม 2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พลศาสตร์ของคลื่นการกระตุ้นสามมิติที่ถูกตรึงบางส่วนกับสิ่งกีดขวาง
ในตัวกลางเคมีกระตุ้นได้

โดย

ผศ. ดร. ชัยยะ เหลืองวิริยะ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : **RSA5880033**

ชื่อโครงการ : พลศาสตร์ของคลื่นการกระตุ้นสามมิติที่ถูกตรึงบางส่วนกับสิ่งกีดขวาง
ในตัวกลางเคมีกระตุ้นได้

ชื่อนักวิจัย : ผศ. ดร. ชัยยะ เหลืองวิริยะ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อีเมลล์ : fscicyl@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

บทคัดย่อ:

คลื่นสไปรอลในตัวกลางกระตุ้นได้ซึ่งเกิดขึ้นในตัวกลางชนิดต่าง ๆ กัน สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกปฏิกิริยาและการแพร่ที่คล้ายคลึงกัน ในส่วนของงานวิจัยด้านการทดลองนิยมใช้ตัวกลางเคมีปฏิกิริยาบีโลซอฟ-ซาบอทินสกี เนื่องด้วยความสะดวกในการเตรียมตัวกลางตลอดจนการบันทึกผลการทดลองสำหรับตัวกลางที่หนามาก คลื่นสไปรอลในสามมิติเรียกว่าคลื่นสเกลล์ คลื่นประเภทนี้มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ กล่าวคือ คลื่นศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบสไปรอลเป็นสาเหตุของโรคหัวใจบางชนิด เช่น ventricular tachycardia และ ventricular fibrillation อันเป็นสาเหตุหลักของหัวใจวาย คลื่นนี้มักถูกตรึงกับสิ่งกีดขวาง เช่นกลุ่มเซลล์ที่ตายหรือเส้นเลือดซึ่งทำให้ภาวะ tachycardia คงอยู่นานขึ้น

ผู้วิจัยได้พบการจัดการตัวเองของโครงสร้างคลื่นในสามมิติซึ่งในตอนเริ่มต้นคลื่นสเกลล์มีโครงสร้างอย่างง่ายคือแกนกลางมีลักษณะตรงและส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระแต่อีกส่วนหนึ่งถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางโดยส่วนอิสระมีคาบเวลาน้อยกว่าส่วนที่ถูกตรึง เมื่อเวลาผ่านไปโครงสร้างคลื่นในส่วนที่ถูกตรึงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปเกลียวเกลียวโดยทั้งสองส่วนเคลื่อนที่แบบประสานกันจนมีคาบเวลาเท่ากันทั้งระบบ เมื่อป้อนเกรเดียนท์อุณหภูมิเพื่อทำให้คลื่นส่วนที่อิสระเคลื่อนที่เร็วขึ้นพบว่าการบิดเป็นเกลียวมากขึ้นจนทำให้คลื่นทั้งส่วนอิสระและส่วนที่ถูกตรึงบิดเป็นเกลียวทั้งหมด ผลวิจัยนี้อยู่ในระหว่างเตรียมร่างเพื่อเสนอตีพิมพ์

ในกรณีที่คลื่นถูกตรึงทั้งตัวกลาง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการกำจัดคลื่นออกจากจุดตรึงโดยการป้อนกระแสไฟฟ้า ปรากฏว่าคลื่นหลุดออกจากการตรึงกับสิ่งกีดขวางที่มีรูปร่างแตกต่างกันได้เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าค่าวิกฤตหนึ่ง ค่าวิกฤตนี้เพิ่มขึ้นตามเส้นรอบวงของสิ่งกีดขวางและไม่ขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด ผลวิจัยดังกล่าวได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ Chemical Physics Letters

คำหลัก: คลื่นสไปรอล, คลื่นสเกลล์, การตรึง, การจัดการตัวเอง, ปฏิกิริยาบีโลซอฟ-ซาบอทินสกี, กลไกแบบจำลองออเรกอนเนเตอร์ ปฏิกิริยาและการแพร่

Abstract

Project Code : TRG5680044

Project Title : Elimination of waves pinned to obstacles with different shapes and orientations in excitable chemical media

Investigator : Assist. Prof. Dr. Chaiya Luengviriya, Kasetsart University

E-mail Address : fscicyl@ku.ac.th

Project Period : 2 years

Abstract:

Spiral waves, i.e., reentrant self-organizing structures of excitation, evolve in thin layers of various excitable media and are governed by reaction-diffusion mechanisms. Due to the convenient experimentation, a chemical medium namely the Belousov-Zhabotinsky (BZ) reaction is one of the most popular prototypes to study the dynamics of spiral waves experimentally. Scroll waves, i.e., three-dimensional (3D) versions of spiral waves, occur in thick media and also have an important impact on human health conditions. Scroll waves of electrical excitation in the heart are involved in causing certain types of cardiac arrhythmia, such as ventricular tachycardia. The waves are often pinned to local unexcitable obstacles, such as scars and blood vessels and tachycardia can last longer. Furthermore, deformations of wave structures can cause electrical turbulences so-called fibrillations which potentially lead to sudden cardiac death.

We observed synchronizations and self-organizations of the 3D wave structures. At the beginning, the scroll waves had a simple straight form but the wave period of the pinned part was longer than the freely moving part. In the course of time, the two parts had synchronized, i.e., the entire 3D wave structure had one single wave period. The shape of the freely moving part remained simply straight while the pinned part of scroll waves was self-organized into helical shapes. When a temperature gradient was applied to the medium to decrease the wave period of the freely moving part, the whole structure was twisted so both freely moving and pinned parts took a helical form. We are preparing a manuscript of the results for publication.

For fully pinning cases, we study unpinning of waves by electrical forcing. The pinned waves were released from different shaped obstacles when the applied electrical current density was higher than a threshold. We found that the forcing threshold increases with the obstacle circumference, regardless the cross section area. The findings were published in Chemical Physics Letters.

Keywords: spiral waves, scroll waves, pinning, self-organization, Belousov-Zhabotinsky reaction, Oregonator model, reaction-diffusion mechanism

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับ
เงินทุนวิจัย ในโครงการนี้

ผศ. ดร. ชัยยะ เหลืองวิริยะ
(หัวหน้าโครงการวิจัย)

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเสถียรภาพของคลื่นสกรอลล์ซึ่งมีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางสม่ำเสมอและภายใต้เกรเดียนตุนอณหภูมิและการกำจัดคลื่นที่ถูกตรึงดังกล่าวด้วยสนามไฟฟ้าในตัวกลางเคมีปฏิกิริยาบีโลซอฟ-ซาบอทินสกี พลศาสตร์ของคลื่นในตัวกลางที่ถูกกระตุ้นได้ (excitable media) ซึ่งมีความสำคัญดังเช่น คลื่นในตัวกลางสองมิติเกี่ยวข้องกับการกำจัดก๊าซมลพิษจากท่อไอเสีย (clean exhaust) [3] ซึ่งเป็นผลงานส่วนหนึ่งที่ทำให้ศาสตราจารย์เอรท์ล (Prof. G. Ertl) ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมี ในปี ค.ศ. 2007 [4]

ในส่วน of คลื่นสามมิตินั้น นักวิทยาศาสตร์จากหลายแขนงสาขาให้ความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีผลการวิจัยโดยใช้เนื้อเยื่อหัวใจจากสัตว์ [17] ที่สนับสนุนว่า คลื่นศักย์ไฟฟ้าในสามมิติที่เรียกว่าคลื่นสกรอลล์ (scroll wave) เป็นสาเหตุของโรคหัวใจบางชนิด เช่น ventricular tachycardia ซึ่งมีผลให้จังหวะการเต้นของหัวใจเร็วขึ้นแต่ประสิทธิภาพการสูบฉีดโลหิตลดลง การที่คลื่นดำรงอยู่ในหัวใจได้นานนั้นเชื่อว่าเกิดจากการที่คลื่นถูกตรึงไว้กับจุดบกพร่อง (localized defect) ในตัวกลาง

สถานการณ์จะเลวร้ายมากขึ้นหากเกิดปรากฏการณ์คลื่นโกลาหลของวินฟรี (Winfree turbulence) [18] ซึ่งเรียกขานตามชื่อศาสตราจารย์วินฟรี (Prof. A.T. Winfree) ผู้รายงานการพบปรากฏการณ์ สิ่งที่น่าสนใจคือ ปรากฏการณ์นี้เกิดเฉพาะในแผ่นเนื้อเยื่อหัวใจที่หนา (สามมิติ) เท่านั้น ปรากฏการณ์คลื่นโกลาหลนี้มีผลให้เกิดภาวะ ventricular fibrillation อันเป็นสาเหตุหลักของหัวใจวาย ผลกระทบโดยตรงต่อมนุษย์นี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่กระตุ้นให้เกิดการวิจัยในด้านการควบคุมพลศาสตร์ของคลื่นทั้งในสองและสามมิติ รวมทั้งการระงับความโกลาหลของคลื่น อย่างกว้างขวางในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา [20]

เป็นที่ทราบกันดีว่า ในหัวข้อวิจัยเดียวกันนั้น การทดลองคลื่นในสามมิติซับซ้อนมากกว่าการทดลองสองมิติ โครงการวิจัยนี้จึงศึกษาคลื่นในสองมิติเพื่อให้ได้เงื่อนไขทางการทดลองที่เหมาะสม ผลจากโครงการวิจัยนี้จะเป็นเครื่องชี้แนะให้การทดลองในสามมิติในโครงการวิจัยต่อไป ในโครงการนี้ได้เลือกศึกษาคลื่นในตัวกลางเคมี คือ ปฏิกิริยาบีโลซอฟ-ซาบอทินสกี (Belosov-Zhabotinsky reaction) [6,7] โดยจะใช้ปฏิกิริยาที่ได้รับการปรับปรุงแล้วซึ่งมีส่วนผสมของไพโรแกลลอล (pyrogallol) [28-30] เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาฟองอากาศซึ่งรบกวนการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อทำการทดลองเป็นเวลานาน

การเลือกศึกษาตัวกลางแบบเคมีนั้นมีเหตุผลสองประการคือ ประการแรก เป็นที่ยอมรับในวงการวิจัยว่า พลศาสตร์ของคลื่นในตัวกลางที่ถูกกระตุ้นได้ชนิดต่าง ๆ กันนั้นเกิดจากกลไกเดียวกันคือ กลไกปฏิกิริยาและการแพร่ (reaction-diffusion mechanism) [1] ซึ่งตัวกลางแต่ละชนิดอาจมีรายละเอียดที่ต่างกัน ดังนั้นความรู้ที่ได้จากการศึกษาคลื่นในตัวกลางเคมีจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวกลางอื่น ๆ ได้ และประการที่สอง การเตรียมตัวกลางเคมีง่ายกว่าตัวกลางแบบสิ่งมีชีวิตและย่อมทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลได้ง่ายกว่า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเสถียรภาพของคลื่นสเกลที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางสม่ำเสมอ
2. เพื่อศึกษาเสถียรภาพของคลื่นสเกลที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางที่มีเกรเดียนท์อุณหภูมิ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากโครงการวิจัยนี้จะทำให้พลศาสตร์ของคลื่นกระจ่างมากขึ้นและผลงานตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้เพื่อเผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาตัวกลางเคมีซึ่งมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นในช่วงต่ำซึ่งทำให้คลื่น สไปรอลในตัวกลางนี้มีอัตราเร็วไม่มากนัก และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ป้อนเพื่อบังคับคลื่นสไปรอลมีค่าต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนปริมาณมากในตัวกลางเคมี

2. ทฤษฎี

ตัวกลางที่ถูกกระตุ้นได้และคลื่นสไปรอล

ปรากฏการณ์คลื่นในตัวกลางที่ถูกกระตุ้นได้ (excitable media) เกิดขึ้นในตัวกลางชนิดต่าง ๆ กัน แต่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีเดียวกัน คือ กลไกปฏิกิริยาและการแพร่ (reaction-diffusion mechanism) [1] ของตัวกระตุ้น (activator) ซึ่งทำหน้าที่นำคลื่น และ ตัวยับยั้ง (inhibitor) ซึ่งทำหน้าที่ลดบทบาทของตัวกระตุ้น กลไกปฏิกิริยาและการแพร่นี้ทำให้คลื่นในตัวกลางที่ถูกกระตุ้นได้มีลักษณะเฉพาะตัว กล่าวคือ ในตัวกลางที่บางมาก (สองมิติ) หากหน้าคลื่นถูกทำให้ขาดเกิดเป็นปลายเปิด ปลายเปิดนั้นจะขดม้วนเกิดเป็นคลื่นสไปรอล (spiral wave) [2] และจะเกิดคลื่นในตัวกลางอย่างไม่มีที่สิ้นสุดโดยไม่ต้องการแหล่งกำเนิดคลื่นจากภายนอก ในกรณีนี้จุดที่ปลายเปิดหรือหัวสไปรอล (spiral tip) ทำหน้าที่เสมือนแหล่งกำเนิดคลื่นและมักเรียกว่าศูนย์บัญชาการ (organizing center) ของคลื่น

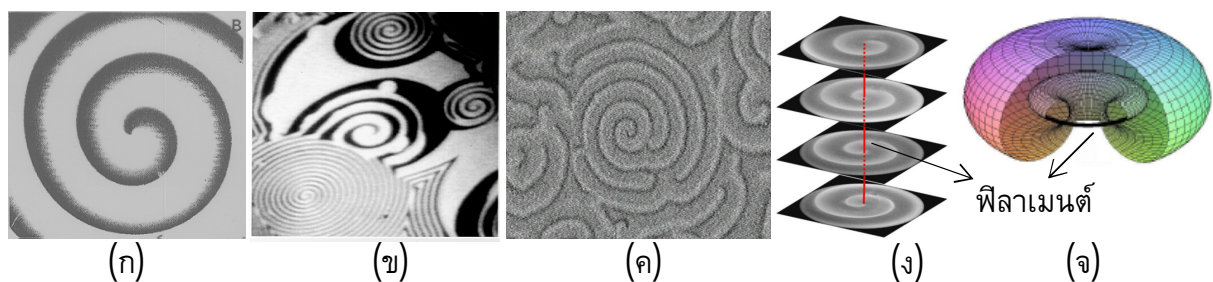
ตัวอย่างคลื่นสไปรอลในตัวกลางต่างๆ (รูปที่ 2.1 ก-ค) ได้แก่ คลื่นออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์บนผิวทองคำขาว (clean exhaust) [3,4] คลื่นการรวมตัวกันของราเมือก [5] รวมทั้งคลื่นความเข้มข้น (concentration wave) ในตัวกลางปฏิกิริยาบีโลซอฟ-ซาบอตินสกี (Belosov-Zhabotinsky reaction) [6,7] ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิจัยมากกว่าตัวกลางอื่นๆ ในสาขานี้ งานวิจัยคลื่นสไปรอลในตัวกลางปฏิกิริยานี้พบว่าวิถีหัวสไปรอล (spiral tip trajectory) อาจเป็นรูปแบบอย่างง่ายคือวงกลม หรือ รูปแบบที่ซับซ้อนซึ่งเรียกว่ามีอันเดอร์ริง (meandering) [8-10] อีกทั้งวิถีหัวสไปรอลสามารถควบคุมได้โดยปัจจัยภายนอก เช่น แสง [11,12] หรือ สนามไฟฟ้า [13,14]

คลื่นสกรอลล์และโรคหัวใจบางชนิด

สำหรับคลื่นในตัวกลางสามมิติเรียกว่าคลื่นสกรอลล์ (scroll wave) [15] สามารถเทียบเคียงได้กับการนำตัวกลางสองมิติที่มีคลื่นสไปรอลมาซ้อนต่อกัน ในกรณีนี้ศูนย์บัญชาการคือฟิลาเมนต์ (filament) ซึ่งเป็นเส้นในสามมิติที่เชื่อมต่อระหว่างหัวสไปรอลในชั้นที่อยู่ติดกัน การเคลื่อนที่ของฟิลาเมนต์จะซับซ้อนตามความโค้ง (curvature) และการบิด (twist) ของฟิลาเมนต์ [16] ตัวอย่างรูปแบบของฟิลาเมนต์อย่างง่าย (รูปที่ 2.1 ง-จ) คือ เส้นตรงและวงกลม อนึ่ง คลื่นสกรอลล์ที่มีฟิลาเมนต์เป็นวงนั้น นิยมเรียกว่าสกรอลล์ริง (scroll ring) [16]

คลื่นสกรอลล์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจาก มีการทดลองโดยใช้เนื้อเยื่อหัวใจจากสัตว์ที่สนับสนุนว่า คลื่นสกรอลล์เป็นสาเหตุของโรคหัวใจบางชนิด [17] กล่าวคือ โดยปกติแล้วคลื่นศักย์ไฟฟ้าซึ่งทำให้อเนื้อเยื่อหัวใจหดและขยายเพื่อสูบฉีดโลหิตมีรูปแบบเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นทรงกลม (truncated spherical wave) แต่หากหัวใจมีความผิดปกติบางอย่างจนทำให้คลื่นศักย์ไฟฟ้างดงเปลี่ยนรูปแบบเป็นคลื่นสกรอลล์ หัวใจจะเต้นเร็วขึ้นตามความถี่ของคลื่นสกรอลล์และประสิทธิภาพการสูบฉีดโลหิตจะลดลง (tachycardia) หากคลื่นสกรอลล์นั้นแตกออกเป็นคลื่นสกรอลล์ย่อยๆ เกิดเป็นความโกลาหลของศักย์ไฟฟ้า (electrical turbulence) จะทำให้อเนื้อเยื่อหัวใจแต่ละส่วนหดขยายไม่ประสานกัน (fibrillation) และไม่สามารถสูบฉีดโลหิตได้เลย

ศาสตราจารย์วินฟรี (A.T. Winfree) ได้รายงานผลวิจัย [18] ที่ใช้แผ่นเนื้อเยื่อหัวใจว่า พบการเปลี่ยนรูปของคลื่นสไปรอลที่ผิวเนื้อเยื่อเป็นคลื่นโกลาหลเมื่อแผ่นเนื้อเยื่อนั้นหนากว่าค่าจำกัดค่าหนึ่ง ดังนั้นปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเฉพาะในตัวกลางสามมิติเท่านั้น (จวบจนปัจจุบัน วิธีสังเกตการณ์สามมิติเต็มรูปแบบของคลื่น ไฟฟ้าในเนื้อเยื่อหัวใจยังคงอยู่ในขั้นพัฒนา [19]) ในภายหลังนักวิจัยได้ขนานนามว่าปรากฏการณ์คลื่นโกลาหลของวินฟรี (Winfree turbulence) เนื่องด้วยผลกระทบโดยตรงต่อมนุษย์นี้ นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากได้ทุ่มเทวิจัยในด้านการควบคุมคลื่นทั้งในตัวกลางสองและสามมิติ รวมทั้งการระงับความโกลาหลของคลื่น ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา [20]



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างคลื่นสไปรอล (ก) ในตัวกลางปฏิิกิริยา-ดิฟฟูชัน [2] (ข) คลื่นออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์บนผิวทองคำขาว [3] (ค) คลื่นการรวมตัวกันของราเมือก [5] คลื่นสกรอลล์ซึ่งเปรียบได้กับการนำคลื่นสไปรอลมาซ้อนต่อกัน เช่น (ง) คลื่นสกรอลล์ซึ่งมีฟิลาเมนต์เป็นเส้นตรง [21] และ (จ) สกรอลล์ริงมีฟิลาเมนต์เป็นวง [22]

การควบคุมคลื่นด้วยสนามไฟฟ้า

การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าต่อคลื่นทั้งในตัวกลางเคมีและในการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์นั้นพบว่า สนามไฟฟ้ามีผลให้หัวสไปรอลเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงทำมุมกับสนามไฟฟ้า โดยอัตราเร็วและขนาดของมุมขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้า [13,14] ผลการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์อีกฉบับหนึ่ง [23] ได้แสดงว่า เมื่อกำหนดให้สนามไฟฟ้าคงที่ อัตราเร็วและขนาดของมุมดังกล่าวขึ้นกับสภาพกระตุ้นได้ของตัวกลางผลของสนามไฟฟ้าต่อคลื่นในสามมิติขึ้นกับรูปร่างของฟิลาเมนต์ เช่น ในบทความของนักวิจัยที่ปรึกษาและคณะได้รายงานว่า วงฟิลาเมนต์จะเคลื่อนที่สวนทางกับทิศของสนามไฟฟ้าและขณะเดียวกันแรงจากสนามไฟฟ้ามีผลให้ระนาบของฟิลาเมนต์จัดเรียงตัวใหม่ (reorientation) [24,25] หากฟิลาเมนต์เป็นเส้นตรงฟิลาเมนต์จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับกรณีของหัวสไปรอล [26]

อนึ่ง การเคลื่อนที่ของคลื่นสเกลสามารถควบคุมได้ด้วยปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น เกรเดียนต์แสง (light gradient) [27,28] (เมื่อใช้ตัวกลางเคมีที่ไวต่อแสง) และ เกรเดียนต์อุณหภูมิ (temperature gradient) [29,30] ในโครงการวิจัยที่เสนอนี้ได้เลือกใช้สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอทั้งตัวกลางเคมีเป็นปัจจัยภายนอก (ซึ่งสามารถทำได้ง่ายดังที่รายงานในวิทยานิพนธ์ [31]) เพื่อให้การวิเคราะห์ การวิจารณ์ และการสรุปผลการทดลองเป็นไปอย่างชัดเจน ในขณะที่การควบคุมด้วยแสงหรืออุณหภูมินั้น เกรเดียนต์จะเปลี่ยนตามตำแหน่งในตัวกลางและมีผลให้การเคลื่อนที่ของคลื่นสเกลซับซ้อนมากขึ้น [32]

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การเตรียมตัวกลางเคมีในลักษณะวุ้น

ตัวกลางเคมีที่จะใช้ประกอบด้วยสารตั้งต้นดังนี้ แฟโรอิน (ferroin) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โพแทสเซียมโบรเมต (KBrO_3) และ กรดมาโลนิค (Malonic acid) เพื่อความสะดวก สารตั้งต้นนี้จะถูกเตรียมไว้ในรูปสารละลายเข้มข้น (stock solution) เพื่อใช้สำหรับการทดลองในช่วงประมาณสองสัปดาห์

ตัวกลางเคมีจะถูกเตรียมในลักษณะวุ้น (agar gel) เพื่อป้องกันการรบกวนจากพลศาสตร์ของไหล (hydrodynamic perturbation) ซึ่งเกิดขึ้นในตัวกลางเคมีที่เป็นของเหลว โดยความเข้มข้นวุ้นประมาณ 0.5-1% โดยมวล ขั้นตอนการเตรียมตัวกลางมีดังนี้

1. ต้มผงวุ้นกับน้ำจนเดือด เพื่อให้ผงวุ้นละลายหมด
2. เติมน้ำส่วนที่หายไปเนื่องจากการระเหยในระหว่างที่รอให้น้ำวุ้นเย็นลงที่ประมาณ 40°C
3. ผสมสารตั้งต้นกับน้ำวุ้นในอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ก่อนแล้วเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสาร

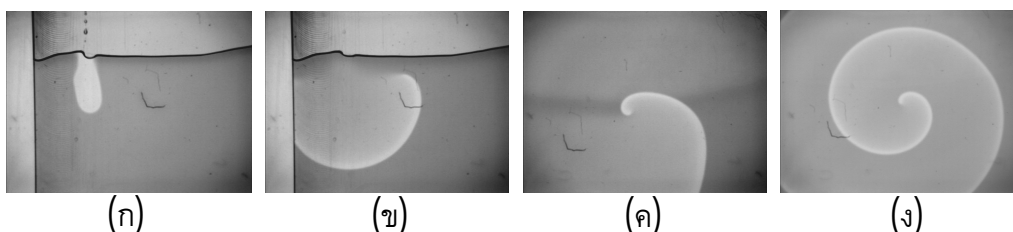
ตัวกลางตามที่ต้องการ เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้แล้ว อุณหภูมิของตัวกลางมีค่าประมาณ 35°C

ตัวกลางนี้จะถูกใช้ทันทีในขั้นตอนการสร้างคลื่น เนื่องจากวุ้นจะจับตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30°C

การสร้างคลื่น

การสร้างคลื่นทั้งในตัวกลางสองมิติและสามมิติใช้หลักการเดียวกัน คือ การทำให้เกิดหน้าคลื่นปลายเปิดในตัวกลาง ในตัวกลางที่บางมากจุดปลายเปิดนี้จะขดเป็นคลื่นสไปรอล ในโครงการนี้จะใช้เทคนิคการเติมสารสองชั้น (two-layer strategy) ขั้นตอนมีดังนี้

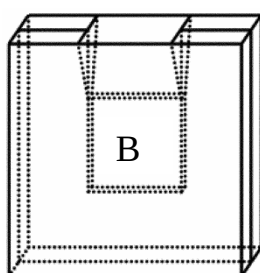
1. เติมสารชั้นแรกประมาณครึ่งความสูงของภาชนะบรรจุตัวกลางเคมี (reactor)
2. จุ่มลวดเงิน (silver wire) ลงในสารชั้นแรกเพื่อกระตุ้นให้เกิดคลื่นรอบๆลวดเงิน (รูปที่ 3.1ก) หน้าคลื่นจะแผ่ออกจากจุดเริ่มต้น และที่ผิวบนของสารชั้นแรกจะเกิดเป็นหน้าคลื่นปลายเปิดซึ่งเป็นจุดในตัวกลางสองมิติ (รูปที่ 3.1ข)
3. เติมสารชั้นที่สองลงบนสารชั้นแรก หน้าคลื่นปลายเปิดจากสารชั้นแรกจะเคลื่อนที่เข้าสู่สารชั้นที่สอง (รูปที่ 3.1ค) และจะขดเกิดเป็นคลื่นสไปรอล (รูปที่ 3.1ง)



รูปที่ 3.1 การสร้างคลื่นสไปรอลในตัวกลางเคมีสองมิติ [10] ในตัวกลางเคมีนี้หน้าคลื่นมีสีฟ้าขณะที่บริเวณอื่นมีสีแดง (ก) คลื่นถูกกระตุ้นด้วยลวดเงิน (ข) คลื่นปลายเปิดในสารชั้นแรก (ค) คลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่สารชั้นที่สองและขดเป็น (ง) คลื่นสไปรอล

ภาชนะบรรจุตัวกลางเคมี

ภาชนะบรรจุตัวกลางเคมี (reactor) มีลักษณะใส ทำจากพลาสติกทนกรด



รูปที่ 3.2 ร่างภาชนะบรรจุตัวกลางเคมี (reactor) สำหรับการทดลองสองมิติ ปริมาตรบรรจุตัวกลาง (BZ) มีขนาด 4×4 ซม.² หนาไม่เกิน 1 มม. [10]

การป้อนสนามไฟฟ้า

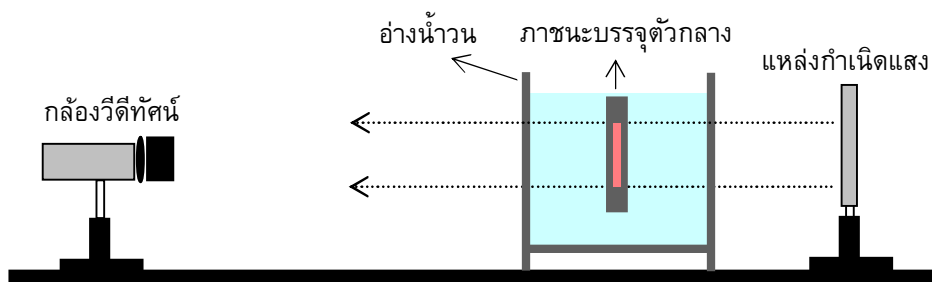
ในการทดลองผลของสนามไฟฟ้าต่อคลื่นสไปรอลนั้นจะใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในโหมด กระแสคงที่ (current constant mode) โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทำจากสแตนเลสลงในอ่างอิเล็กโทรไลต์ เพื่อป้องกันการ เจือปน สารอิเล็กโทรไลต์จึงทำจากสารละลายเคมี (ลักษณะเหลวไม่มีส่วนผสมของวุ้น) ซึ่งมีความเข้มข้น ของสารตั้งต้นเช่นเดียวกับในตัวกลางเคมีซึ่งมีลักษณะเป็นวุ้น ในขณะที่ทำการทดลองจะเกิดก๊าซที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถระบายออกทางปล่องได้

การควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำวน

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อสมบัติของคลื่นในตัวกลางนี้ เช่น อัตราเร็ว คาบเวลา ความถี่ เป็นต้น อีกทั้ง การป้อนกระแสไฟฟ้า (เพื่อสร้างสนามไฟฟ้า) ให้กับตัวกลางในบางการทดลองมีผลให้เกิดความร้อนใน ตัวกลาง ในทุกการทดลองจึงมีการควบคุมอุณหภูมิของตัวกลางโดยจัดตั้งภาชนะที่บรรจุตัวกลางเคมีลงใน อ่างน้ำวน อุณหภูมิของตัวกลางจะถูกควบคุมไว้ที่ 25°C อ่างนี้ทำจากพลาสติกใส ลักษณะเป็นกล่อง ลูกบาศก์ผิวเรียบเพื่ออำนวยความสะดวกแก่การบันทึกผลการทดลองผ่านกล้องวีดิทัศน์

ชุดทดลองและการบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3.3 แสดงร่างชุดทดลองสำหรับการทดลองคลื่นสองมิติ การบันทึกผลการทดลองเริ่มจาก แหล่งกำเนิดแสงขาวจากแฟลชหลอดฟลูออเรสเซนต์ส่องผ่านแผ่นแก้วฝ้า (milky glass) ซึ่งทำให้ความเข้ม แสงสม่ำเสมอขึ้น จากนั้นแสงจะเดินทางผ่านอ่างน้ำวนและภาชนะบรรจุตัวกลางเคมี (รูปที่ 3.2) ไปยังกล้องวี ดีทัศน์ สัญญาณจากกล้องวีดิทัศน์จะถูกแปลงเป็นภาพดิจิทัลขาวดำ (gray scale) ก่อนบันทึกลงในเครื่อง คอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.3 ร่างชุดทดลองสำหรับการทดลองสองมิติ [10]

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องจากอัตราเร็วหน้าคลื่นในตัวกลางที่ถูกกระตุ้นได้แปรผกผันกับความโค้งของหน้าคลื่น โดยเฉพาะหน้าคลื่นที่อยู่ใกล้หัวสไปรอล คลื่นจึงเคลื่อนที่เร็วขึ้นตามระยะห่างจากหัวสไปรอล (ความโค้ง ลดลง) สำหรับหน้าคลื่นที่อยู่ห่างจากหัวสไปรอลมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นอัตราเร็วมีค่าคงที่โดยประมาณ (ความโค้งเปลี่ยนแปลงน้อยมาก) ในงานวิจัยนี้จะวัดความยาวคลื่นและคาบเวลาในบริเวณที่ห่างจากหัวสไป รอลประมาณหนึ่งถึงสองความยาวคลื่น และคำนวณอัตราเร็วหน้าคลื่นจากผลหารของความยาวคลื่นและ คาบเวลา

การจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์

สนามไฟฟ้ามีผลต่อคลื่นในตัวกลางเคมีที่ใช้เนื่องจากในตัวกลางนี้ประกอบด้วยไอออนจำนวนมาก ซึ่งผลของสนามไฟฟ้าสามารถจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์โดยใช้กลไกปฏิกิริยาและการแพร่ผนวกกับเทอมเกรเดียนต์ในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ในกรณีการบ่อนสนามไฟฟ้าขนาด E ในทิศ x ความเข้มข้นของตัวกระตุ้น u (activator) และ ตัวยับยั้ง v (inhibitor) เปลี่ยนแปลงตามเวลา t ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(u - u^2 - f v \frac{u - q}{u + q} \right) + D_u \nabla^2 u - M_u E \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = u - v + D_v \nabla^2 v - M_v E \frac{\partial v}{\partial x}$$

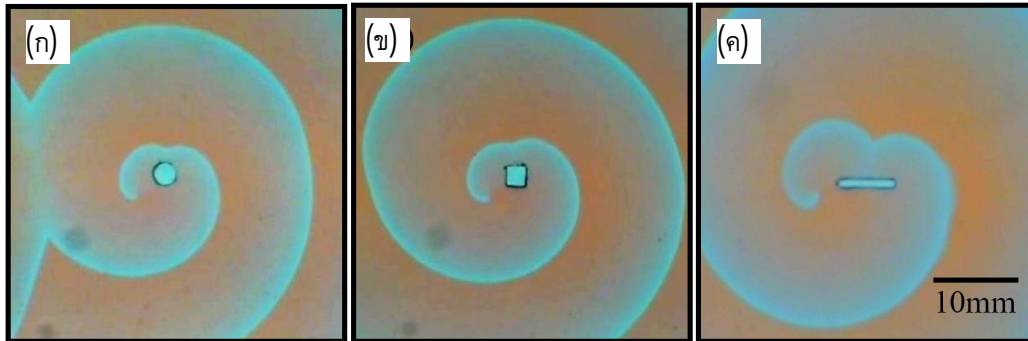
ค่าพารามิเตอร์ที่ให้วิธีหวัสโปรอลเป็นวงกลมเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า คือ $\varepsilon = 0.01$, $q = 0.002$, $f = 1.4$ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $D_u = 1$, $D_v = 0.6$ ส่วนค่าสภาพการเคลื่อนที่ของไอออน (ionic mobility) มีค่า $M_u = -1.0$ $M_v = 2.0$

จุดบกพร่องสำหรับตริงคลื่นคือบริเวณที่คลื่นไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปได้ ซึ่งจำลองโดยใช้หลักการของผนังที่สารผ่านไม่ได้ (no flux boundary) ในการจำลองแบบจะใช้วัตถุทรงกระบอกขนาดต่าง ๆ กัน เพื่อตริงคลื่นเช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง

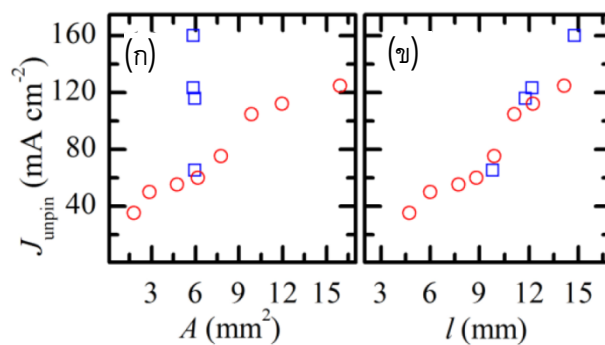
4. ผลวิจัย

4.1 การใช้สนามไฟฟ้ากำจัดคลื่นสไปรอลจากการตรึง (เพิ่มเติมจากแผนเดิม)

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการใช้สนามไฟฟ้ากำจัดคลื่นสไปรอลจากการตรึงด้วยสิ่งกีดขวางวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดต่างกันและสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้างยาวต่างกัน โดยสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดพื้นที่เท่ากัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1



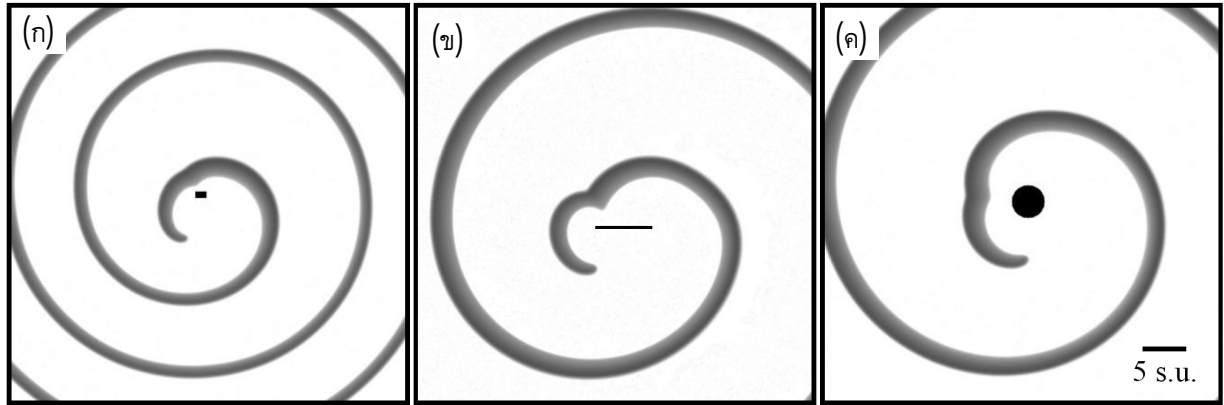
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างภาพการใช้สนามไฟฟ้ากำจัดคลื่นสไปรอลจากการตรึงด้วยสิ่งกีดขวางวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ก) วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 (ข) สี่เหลี่ยมผืนผ้า 2.3×2.6 ตารางมิลลิเมตร และ (ค) สี่เหลี่ยมผืนผ้า 6.5×0.9 ตารางมิลลิเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในรูป (ก) – (ค) คือ 57, 67, และ 160 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



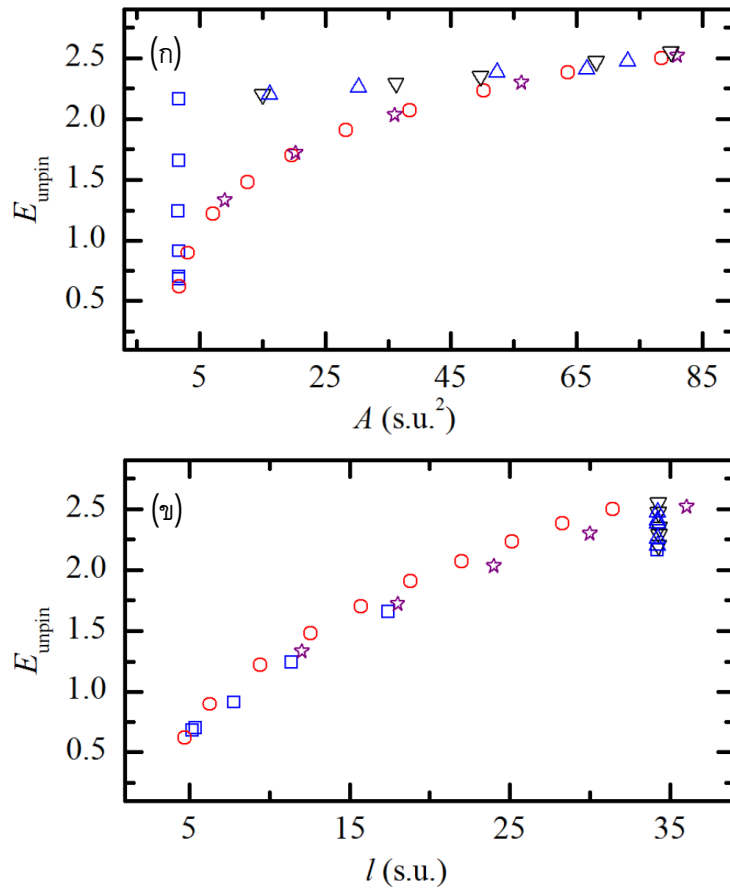
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวิกฤติ J_{unpin} กับ (ก) พื้นที่ และ (ข) เส้นรอบวงสัญลักษณ์วงกลมและสี่เหลี่ยมแทนรูปร่างของสิ่งกีดขวาง

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเกินค่าวิกฤติ J_{unpin} หัวสไปรอลจะเคลื่อนที่ออกจากสิ่งกีดขวาง ค่าวิกฤติ J_{unpin} เพื่อขึ้นตามขนาดสิ่งกีดขวาง สำหรับกรณีของวงกลมเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นทั้งพื้นที่และเส้นรอบวงมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่สำหรับสี่เหลี่ยมที่มีขนาดกว้างยาวต่างกันนั้นผู้วิจัยได้เลือกให้พื้นที่สี่เหลี่ยมเท่ากันแต่เส้นรอบวงต่างกัน จากกราฟในรูปที่ 4.2a แสดงให้เห็นว่าค่าวิกฤติ J_{unpin} เพิ่มขึ้นตามพื้นที่ของวงกลม ในขณะที่สี่เหลี่ยมที่ต่างกันซึ่งมีพื้นที่เท่ากันก็ยิ่งทำให้ค่าวิกฤติ J_{unpin} ต่างกันด้วย จากกราฟในรูปที่ 4.2b จะเห็นว่าค่าวิกฤติ J_{unpin} เพิ่มขึ้นตามเส้นรอบวงสำหรับสิ่งกีดขวางรูปร่างต่างกันทั้งวงกลมและสี่เหลี่ยม ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า เส้นรอบวงเป็นตัวแปรที่เหมาะสม

สำหรับใช้เป็นขนาดของสิ่งกีดขวางในปรากฏการณ์ที่ศึกษา ผู้วิจัยได้ทำการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลการทดลองดังตัวอย่างภาพในรูปที่ 4.3 และค่าสนามไฟฟ้าในรูปที่ 4.4

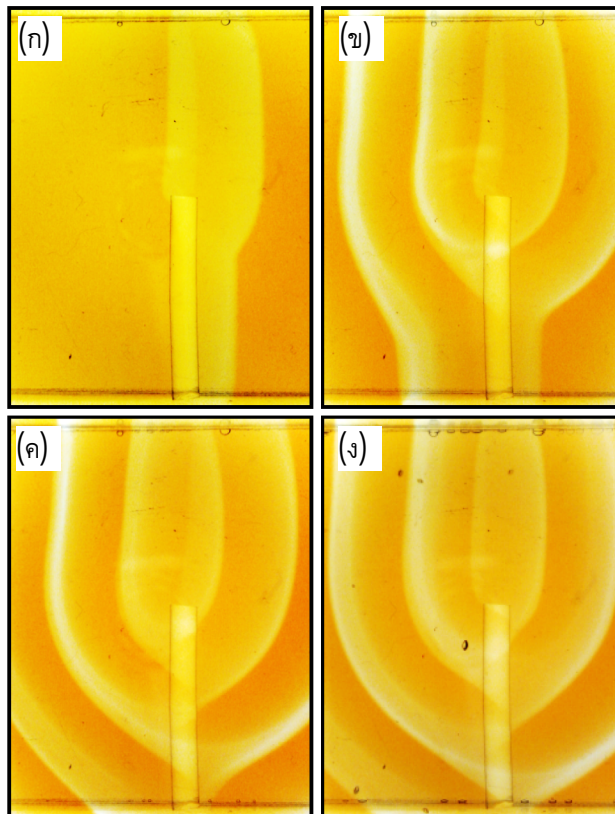


รูปที่ 4.3 ตัวอย่างภาพการใช้สนามไฟฟ้ากำจัดคลื่นสไปรอลออกจากการตรึงด้วยสิ่งกีดขวางวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (ก) 1.7×1.0 (ข) 8.5×0.2 และ (ค) วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.0 สนามไฟฟ้าในรูป (ก) – (ค) คือ 0.695, 1.655 และ 1.700 ตามลำดับ

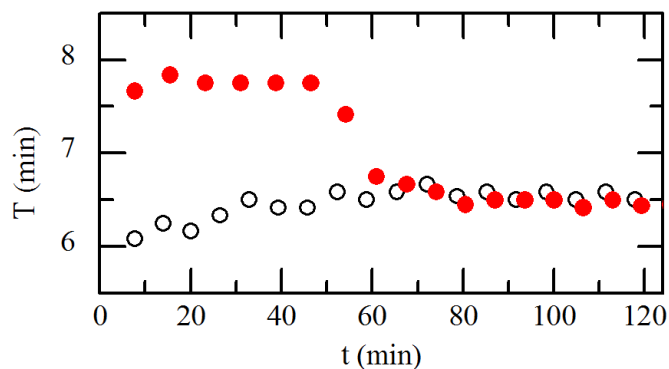


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_{unpin} กับ (ก) พื้นที่ และ (ข) เส้นรอบวง ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ สัญลักษณ์แทนสิ่งกีดขวาง ○: วงกลม, □: สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่คงที่, ☆: สี่เหลี่ยมจัตุรัส, △: สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเส้นรอบวงคงที่, และ ∇: วงรีที่มีเส้นรอบวงคงที่

4.2 คลื่นสกอัลที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางเคมีสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพคลื่นสกอัลที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางเคมีที่เวลา (ก) 10 (ข) 40 นาที (ค) 70 นาที และ (ง) 120 นาที สิ่งกีดขวางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตรและความยาว 15.0 มิลลิเมตร

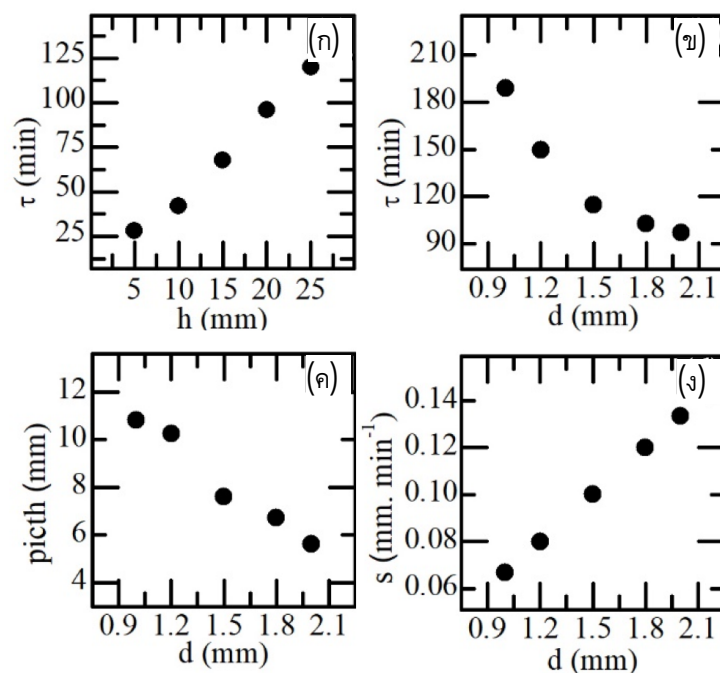


รูปที่ 4.6 คาบเวลาของคลื่นสกอัลที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางเคมี วงกลมทึบและวงกลมกลวงเป็นคาบเวลาส่วนที่ถูกตรึงและส่วนอิสระ ตามลำดับ สิ่งกีดขวางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตรและความยาว 15.0 มิลลิเมตร

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองสร้างคลื่นสก็อตให้ตรงกับสิ่งกีดขวางทรงกระบอกทำจากพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวต่าง ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.5 ในช่วงเริ่มต้นคลื่นสก็อตมีลักษณะตรงหลังจากเวลาผ่านไปโครงสร้างของคลื่นสก็อตส่วนบนซึ่งเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีลักษณะตรงเช่นเดิมแต่ส่วนล่างซึ่งถูกตรึงโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดจนในลักษณะคล้ายกำแพงปลาในภาพโปรเจกชัน แสดงว่าส่วนที่ถูกตรึงนี้มีโครงสร้างเป็นเกลียวเฮลิคในตัวกลางสามมิตินั่นเอง

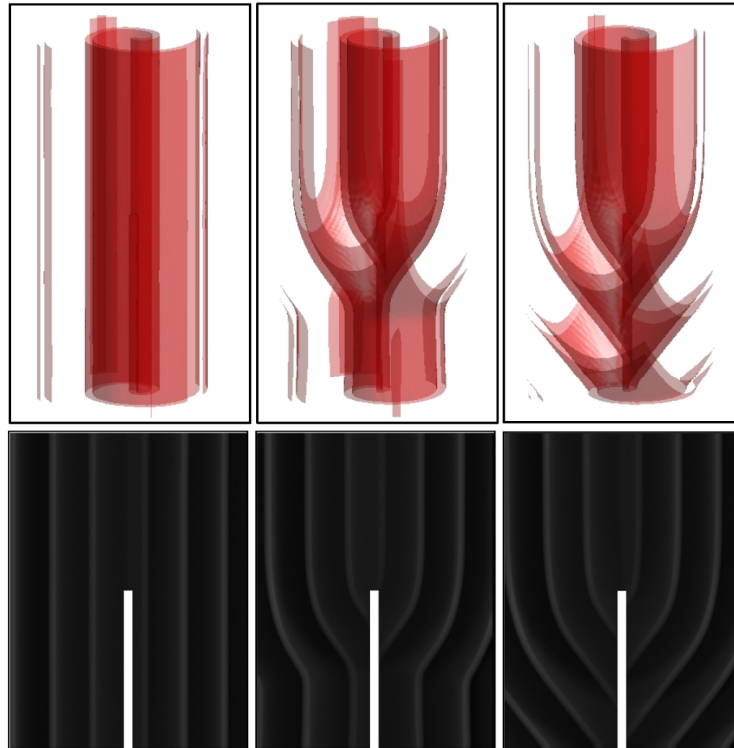
จากการวิเคราะห์คาบเวลาของคลื่นสก็อตพบว่า ในช่วงแรกคาบเวลาด้านบนสุดซึ่งเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีค่าน้อยกว่าคาบเวลาด้านล่างสุดซึ่งถูกตรึงดังแสดงในรูปที่ 4.6 หลังจากนั้นประมาณ 70 นาที่ซึ่งคลื่นด้านล่างบิดเป็นเกลียวทั้งหมดแล้ว คาบเวลาของคลื่นด้านล่างจะมีค่าลดลงทำให้คาบเวลาของทั้งตัวกลางเท่ากันทั้งหมด

รูปที่ 4.7 แสดงการศึกษาพลศาสตร์คลื่นสก็อตที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางเคมีอย่างเป็นระบบโดยการเปลี่ยนขนาดของสิ่งกีดขวางทั้งความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง ผลการทดลองพบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดคงที่ 2.0 มิลลิเมตร ช่วงเวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่างของคลื่นสก็อตเพิ่มขึ้นตามความยาวของสิ่งกีดขวางดังรูปที่ 4.7ก แต่ช่วงเวลาที่ต้องใช้ในการปรับโครงสร้างนี้กลับลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.7ข การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางยังมีผลให้ระยะเกลียว (pitch) ของคลื่นสก็อตลดลงดังรูปที่ 4.7ค และอัตราเร็วของการเปลี่ยนรูปร่างเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.7ง

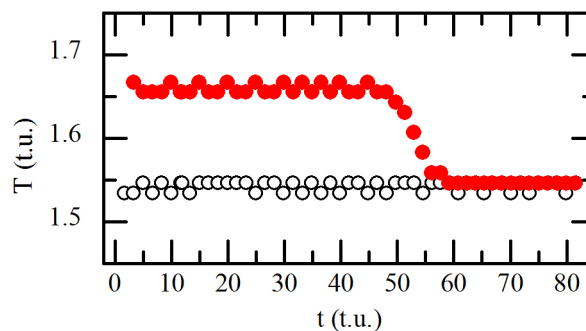


รูปที่ 4.7 พลศาสตร์คลื่นสก็อตที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางเคมี (ก) ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสูงของสิ่งกีดขวาง (ข) ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของสิ่งกีดขวาง (ค) ความสัมพันธ์ของระยะเกลียวและเส้นผ่านศูนย์กลางของสิ่งกีดขวาง และ (ง) ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการเปลี่ยนรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของสิ่งกีดขวาง

ผู้วิจัยได้ทำการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันผลทดลองดังตัวอย่างในรูปที่ 4.8 ในช่วงเริ่มต้นคลื่นสกอัลมีลักษณะตรง หลังจากเวลาผ่านไปโครงสร้างของคลื่นสกอัลส่วนบนซึ่งเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีลักษณะตรงเช่นเดิมแต่ส่วนล่างซึ่งถูกตรึงโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในลักษณะเกลียวเกล็ดจากภาพพื้นผิวซึ่งปรากฏเป็นร่างคล้ายกังปลาในภาพโปรเจกชัน



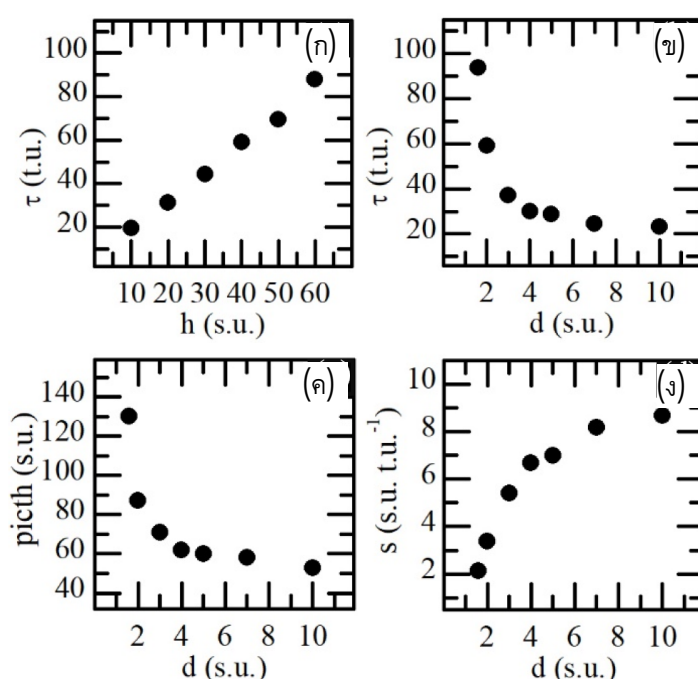
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างภาพคลื่นสกอัลที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ แถวบนและแถวล่างเป็นภาพพื้นผิว (surface plot) และภาพโปรเจกชันด้านบน (top view) ของคลื่น ลำดับภาพจากซ้ายไปขวา เป็นเวลาเริ่มต้น 35 และ 70 หน่วย สิ่งกีดขวางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 หน่วยและความยาว 40.0 หน่วย



รูปที่ 4.9 คาบเวลาของคลื่นสกอัลที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ วงกลมทึบและวงกลมกลวงเป็นคาบเวลาส่วนที่ถูกตรึงและส่วนอิสระ ตามลำดับ สิ่งกีดขวางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 หน่วยและความยาว 40.0 หน่วย

จากการวิเคราะห์คาบเวลาของคลื่นสก็อตพบว่า ในช่วงแรกคาบเวลาด้านบนสุดซึ่งเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระมีค่าน้อยกว่าคาบเวลาด้านล่างสุดซึ่งถูกตรึงดังแสดงในรูปที่ 4.9 หลังจากนั้นประมาณ 60 หน่วย เวลาซึ่งคลื่นด้านล่างบิดเป็นเกลียวทั้งหมดแล้ว คาบเวลาของคลื่นด้านล่างจะมีค่าลดลงทำให้คาบเวลาของ ทั้งตัวกลางเท่ากันทั้งหมด

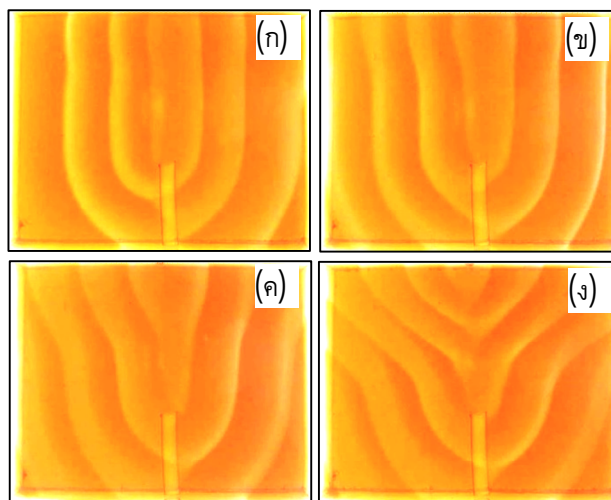
รูปที่ 4.10 แสดงการศึกษาพลศาสตร์คลื่นสก็อตที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางอย่างเป็น ระบบโดยการเปลี่ยนขนาดของสิ่งกีดขวางทั้งความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง มีขนาดคงที่ 2.0 หน่วย ช่วงเวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่างของคลื่นสก็อตเพิ่มขึ้นตามความยาวของสิ่งกีดขวาง ดังรูปที่ 4.10ก แต่ช่วงเวลาที่ต้องใช้ในการปรับโครงสร้างนี้ก็กลับลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสิ่งกีดขวาง เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.10ข การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางยังมีผลให้ระยะเกลียว (pitch) ของคลื่นสก็อต ลดลงดังรูปที่ 4.10ค และอัตราเร็วของการเปลี่ยนรูปร่างเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.10ง



รูปที่ 4.10 พลศาสตร์คลื่นสก็อตที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ก) ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสูงของสิ่งกีดขวาง (ข) ความสัมพันธ์ของ ช่วงเวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของสิ่งกีดขวาง (ค) ความสัมพันธ์ของระยะเกลียว และเส้นผ่านศูนย์กลางของสิ่งกีดขวาง และ (ง) ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการเปลี่ยนรูปร่างและเส้นผ่าน ศูนย์กลางของสิ่งกีดขวาง

4.3 คลื่นสกอในตัวกลางเคมีที่มีเกรเดียนท์อุณหภูมิ

ผู้วิจัยได้ทดลองสร้างคลื่นสกอที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางเคมีและศึกษาผลของเกรเดียนท์อุณหภูมิโดยการป้อนความร้อนที่ผนังด้านหนึ่งของตัวกลาง ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) ก่อนการป้อนเกรเดียนท์อุณหภูมิ คลื่นสกอมีโครงสร้างเช่นเดียวกับที่แสดงในรูปที่ 4.1 ที่ผ่านมา กล่าวคือ ด้านบนซึ่งเคลื่อนที่ได้อิสระคลื่นมีลักษณะตรงแต่ด้านล่างที่ถูกตรึงมีลักษณะเป็นเกลียวเฮลิค หลังป้อนเกรเดียนท์อุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 4.11 (ค) และ (ง) คลื่นส่วนที่อิสระด้านบนมีการบิดเป็นเกลียวด้วยเช่นกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเกรเดียนท์อุณหภูมิเพิ่มการบิดของโครงสร้างคลื่นมากขึ้น ในส่วนการทดลองนี้ผู้วิจัยจะทำการทดลองเพิ่มเติมและทำการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลของเกรเดียนท์อุณหภูมิในรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างภาพคลื่นสกอที่มีบางส่วนถูกตรึงกับสิ่งกีดขวางในตัวกลางเคมีภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิ (ก) และ (ข) ก่อนการป้อนเกรเดียนท์อุณหภูมิ (ค) หลังป้อนเกรเดียนท์อุณหภูมิ 5 นาที และ (ง) 15 นาที สิ่งกีดขวางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตรและมีความยาว 10.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิด้านบนและด้านล่างเป็น 25 และ 23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.M. Turing. The chemical basis of morphogenesis. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. B*, **237**:37-72, 1952.
- [2] A.T. Winfree. Spiral waves of chemical activity. *Science*, **175**:634-636, 1972.
- [3] S. Nettesheim, A. von Oertzen, H.H. Rotermund, and G. Ertl. Reaction diffusion patterns in the catalytic CO-oxidation on Pt(110): Front propagation and spiral waves. *J. Chem. Phys.*, **98**:9977-9985, 1993.
- [4] Website. http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2007
- [5] F. Siegert and C.J. Weijer. Digital image processing of optical density wave propagation in dictyostelium discoideum. *J. Cell Sci*, **93**:325-335, 1989.
- [6] B.P. Belousov. A periodic reaction and its mechanism, In *Sbornik Referatov po Radiatsionni Meditsine. Moscow: Medgiz*, pages 145-147, 1958.
- [7] A.M. Zhabotinsky. Periodic process of the oxidation of malonic acid in solution (study of the kinetics of Belosouv's reaction). *Biofizika*, **9**:306-311, 1964.
- [8] T. Plesser, S.C. Müller, and B. Hess. Spiral wave dynamics as a function of proton concentration in the ferroin-catalyzed Belousov-Zhabotinsky reaction. *J. Phys. Chem.*, **94**:7501-7507, 1990.
- [9] G. Li, Q. Ouyang, V. Petrov, and H.L. Swinney. Transition from simple rotating chemical spirals to meandering and traveling spirals. *Phys. Rev. Lett.*, **77**:2105-2108, 1996.
- [10] C. Luengviriya, U. Storb, M.J.B. Hauser, and S.C. Müller. An elegant method to study an isolated spiral wave in a thin layer of a batch Belousov-Zhabotinsky reaction under oxygen-free conditions. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **8**:1425, 2006.
- [11] O. Kheowan and S.C. Müller. Control of spiral waves in excitable media. *J. Appl. Math. Comp.*, **164**:373-390, 2005.
- [12] O. Kheowan, C. Chan, V.S. Zykov, O. Rangsiman, and S.C. Müller. Spiral wave dynamics under feedback derived from a confined circular domain. *Phys. Rev. E*, **64**:03520, 2001.
- [13] O. Steinbock, J. Schütze, and S.C. Müller. Electric-field-induced drift and deformation of spiral waves in an excitable medium. *Phys. Rev. Lett.*, **68**:248-251, 1992.
- [14] J. Schütze, O. Steinbock, and S.C. Müller. Forced vortex interaction and annihilation in an active medium. *Nature*, **356**:45-46, 1992.
- [15] A.T. Winfree. Scroll-shaped waves of chemical activity in three dimensions. *Science*, **181**:937-939, 1973.
- [16] J.J. Tyson and S.H. Strogatz. The differential geometry of scroll waves. *Int. J. Bif. Chaos*, **1**:723-744, 1991.
- [17] V.I. Krinsky, V.N. Biktashev, and A.M. Pertsov. Autowave approaches to the cessation of autowave arrhythmias. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **591**:232-246, 1990.
- [18] A.T. Winfree. Electrical turbulence in three-dimensional heart muscle. *Science*, **266**:1003-1006, 1994.
- [19] E.M. Cherry and F.H. Fenton. Visualization of spiral and scroll waves in simulated and experimental cardiac tissue. *New J. Phys.*, **10**:125016, 2008.
- [20] A.S. Mikhailov and K. Showalter. Control of waves, patterns and turbulence in chemical systems. *Phys. Rep.*, **425**:79-194, 2006.

- [21] U. Storb, C.R. Neto, M. Bär, and S.C. Müller. A tomographic study of desynchronization and complex dynamics of scroll waves in an excitable chemical reaction with a gradient. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **5**:2344-2353, 2003.
- [22] S. Alonso and A.V. Panfilov. Negative filament tension in the Luo-Rudy model of cardiac tissue. *Chaos*, **17**:015102, 2007.
- [23] H. Henry. Spiral wave drift in an electric field and scroll wave instabilities. *Phys. Rev. E*, **70**:026204, 2004.
- [24] C. Luengviriya, S.C. Müller, and M.J.B. Hauser. Reorientation of scroll rings in an advective field. *Phys. Rev. E*, **77**:015201(R), 2008.
- [25] C. Luengviriya and M.J.B. Hauser. Stability of scroll ring orientation in an advective field. *Phys. Rev. E*, **77**:056214, 2008.
- [26] C. Luengviriya. Dynamics of three-dimensional excitation waves. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, thesis, page 95, 2008.
- [27] T. Amemiya, P. Kettunen, S. Kadar, T. Yamaguchi, and K. Showalter. Formation and evolution of scroll waves in photosensitive excitable media. *Chaos*, **8**:872-878, 1998.
- [28] T. Amemiya, S. Kadar, P. Kettunen, and K. Showalter. Spiral wave formation in three-dimensional excitable media. *Phys. Rev. Lett.*, **77**:3244-3247, 1996.
- [29] A.M. Pertsov, R.R. Aliev, and V.I. Krinsky. Three-dimensional twisted vortices in an excitable chemical medium. *Nature*, **345**:419-421, 1990.
- [30] M. Vinson, S. Mironov, S. Mulvey, and A.M. Pertsov. Control of spatial orientation and lifetime of scroll rings in excitable media. *Nature*, **386**:477-480, 1997.
- [31] C. Luengviriya. Dynamics of three-dimensional excitation waves. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, thesis, page 91, 2008.
- [32] M. Vinson and A.M. Pertsov. Dynamics of scroll rings in a parameter gradient. *Phys. Rev. E*, **59**:2764-2771, 1999.
- [33] C. Luengviriya, J. Luengviriya, M. Sutthiopad, P. Porjai, B. Tomapatanaget, S. C. Müller. Excitability of the Ferroin-Catalyzed Belousov–Zhabotinsky Reaction with Pyrogallol. *Chem. Phys. Lett.*, **561-562**:170–174, 2013.

6. ผลผลิตจากโครงการวิจัย

6.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

ผลการวิจัยจากโครงการนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ Chemical Physics Letters เป็นจำนวน 1 ฉบับ ในชื่อเรื่อง

P. Porjai, M. Sutthiopad, J. Luengviriya, M. Phantu, S. C. Müller, and **C. Luengviriya***. Electrically forced unpinning of spiral waves from circular and rectangular obstacles. *Chem. Phys. Lett.*, **660**: 283, 2016. IF: 1.860.

6.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

เชิงวิชาการ

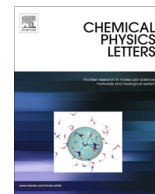
โครงการวิจัยนี้มีส่วนช่วยผลิตนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่
วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทและปริญญาเอกรวม 2 คน

โดยงานวิจัยที่นิสิตได้รับมอบหมายเป็น

ภาคผนวก

ผลการวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติ Chemical Physics Letters เป็นจำนวน 1 ฉบับ ในชื่อเรื่อง

P. Porjai, M. Sutthiopad, J. Luengviriya, M. Phantu, S. C. Müller, and **C. Luengviriya***. Electrically forced unpinning of spiral waves from circular and rectangular obstacles. *Chem. Phys. Lett.*, **660**: 283, 2016. IF: 1.860.



Research paper

Electrically forced unpinning of spiral waves from circular and rectangular obstacles



Porramain Porjai^{a,b}, Malee Sutthiopad^a, Jiraporn Luengviriya^{c,d}, Metinee Phantu^a, Stefan C. Müller^e,
Chaiya Luengviriya^{a,*}

^a Department of Physics, Kasetsart University, 50 Phaholyothin Road, Jatujak, Bangkok 10900, Thailand

^b Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under the Royal Patronage, 1 Moo 20 Phaholyothin Road, Khlong Neung, Klong Luang, Phatum Thani 13180, Thailand

^c Department of Industrial Physics and Medical Instrumentation, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pibulsongkram Road, Bangkok 10800, Thailand

^d Lasers and Optics Research Group, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pibulsongkram Road, Bangkok 10800, Thailand

^e Institute of Experimental Physics, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 June 2016

In final form 19 August 2016

Available online 21 August 2016

ABSTRACT

Unpinning of spiral waves from circular and rectangular obstacles of various sizes under electrical forcing was investigated in both the Belousov-Zhabotinsky reaction and numerical simulations with the Oregonator model. The used rectangles had a similar area size but different circumferences by adjusting width and height, while the area of the circles increased with the circumference. The results showed that for both cases the necessary strength of forcing for unpinning increased with the circumference. This implies that for such unpinning the circumference has a higher impact than the area, at least for circular and rectangular obstacles.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Spiral waves can be observed in different excitable media such as CO oxidation on platinum surfaces [1], cell aggregation in slime mold colonies [2], electrical wave propagation in cardiac tissues [3], and the Belousov-Zhabotinsky (BZ) reaction [4,5]. It is known that electrical spiral waves on the heart are associated with cardiac tachycardia and life-threatening fibrillations [6,7]. Spiral waves are annihilated when their tips drift and hit the boundary of the medium. However, their lifetime is enhanced, if they are pinned to anatomical inhomogeneities or obstacles, e.g., veins or scars [3].

A high-voltage electrical shock can erase simultaneously all propagating waves in the cardiac system but it potentially causes tissue damages so that alternative treatments using a much lower voltage have been being investigated. An application of low-amplitude electric field from a pair of electrodes, known as the virtual electrode method, can modulate the membrane potential near obstacles and induce additional electrical waves [8–11]. The amplitude of electric field for inducing the waves depends on the orientation [9,10] and the curvature [11] of the obstacles.

Other low-voltage method uses a high-frequency train of local stimuli to overcome spiral waves in cardiac tissue cultures

[12–16]. In the BZ reaction, a high-frequency wave train can be produced by a droplet of high concentrated H_2SO_4 since the acid increases the local excitability and ignites waves. The unpinning of spiral waves from circular obstacles by the wave train has been demonstrated [15,16] for different obstacle types, i.e., using oil droplets and laser spots as hard and soft obstacles, respectively. The necessary frequency of the wave train for unpinning increases with the radius of circular obstacles [12–16]. The unpinning may fail, if the spiral waves are pinned to very large obstacles. The success of unpinning can be improved by decreasing the excitability of the medium because the free spiral core is enlarged [14].

Electrically forced unpinning of spiral waves in the BZ reaction has been investigated in different situations. Unlike the virtual method in cardiology, the applied electric field does not induce wave emissions from obstacles but it causes an advective motion of ionic species. In the absence of obstacles, the electric field induces a drift of freely rotating spiral waves [17–19] as well as a reorientation of scroll rings (three-dimensional spiral waves with ring-shaped filaments) [20,21]. Under the forcing, spiral waves are detached from circular obstacles, when the density of the applied electrical current reaches a critical value which increases with the obstacle diameter [22]. For a given circular obstacle, this current density increases with the concentration of H_2SO_4 , which determines the medium excitability and the core size of free spiral waves – the higher $[\text{H}_2\text{SO}_4]$, the higher the excitability and the

* Corresponding author.

E-mail address: fscicyl@ku.ac.th (C. Luengviriya).

smaller the spiral core [23]. These facts imply that it is more difficult to release spiral waves from larger circular obstacles. For three-dimensional BZ media, an applied electric field can release scroll rings from spherical plastic beads [24].

Recently, we have reported the properties of spiral waves pinned to circular and rectangular obstacles [25]. While they are pinned to obstacles with different shapes, the spiral waves have common features: their wave period, wavelength and wave velocity increase with the circumference of the obstacle, regardless of its area. In this article, we present a further study on the electrically forced release of spiral waves from circular and rectangular obstacles, both in experiments with BZ media and in numerical simulations using the Oregonator model [26,27].

2. Experiments

We prepared the Belousov-Zhabotinsky (BZ) solutions as described in previous report [25]. The initial concentrations were as follows: $[H_2SO_4] = 160$ mM, $[MA] = 50$ mM, $[NaBrO_3] = 50$ mM, and $[ferroin] = 0.625$ mM. The BZ reaction was embedded in a 1.0% w/w agarose gel to prevent any hydrodynamic perturbation. Unpinning of spiral waves by electrical forcing was investigated in a flat reactor (volume $100 \times 100 \times 1.0$ mm³) with left and right boundaries attached to electrolytic compartments (size of each $25 \times 100 \times 2.0$ mm³). Eight circles with different diameters of 1.5, 1.9, 2.5, 2.8, 3.1, 3.5, 3.9, and 4.5 mm (areas = 1.8–15.9 mm² and circumferences = 4.7–14.1 mm) and four rectangles with a similar size of area (6 mm²) and different dimensions of 2.3×2.6 , 4.6×1.3 , 4.9×1.2 , and 6.5×0.9 mm² (circumferences = 9.8–14.8 mm) were used as obstacles.

A spiral wave pinned to an obstacle was created by using a two-layer method (cf. Fig. 1 in [22]). A volume of the BZ solution was poured into the reactor as the first layer of about 2.5 cm height, where the obstacle was prior set. A silver wire of 0.5 mm diameter was immersed for a few seconds into the medium to reduce the local concentration of the inhibitor Br^- so that a wave front was ignited. When one open end of the wave front approached the obstacle, another volume of the solution was added as the second layer leading to the final height of 4.5–5.0 cm. Then the wave front curled in and formed a spiral wave pinned to the obstacle.

After a transient interval of a few rotations, i.e., when the form of the spiral wave was stable, an electrical current was applied through electrodes in the electrolytic compartments which connected series with the main volume. As a result of the electrical current, gas bubbles were formed near the surface of the electrodes and caused a temporal fluctuation of the resistance in the system. Therefore, a power supply with a constant electrical current mode was used and the electrical current density was reported in our experiments instead of the electric field, usually used in simulations.

Starting from a low density, the constant electrical current was applied to the reaction for a few spiral rotations before it was increased by a step of $\Delta J = 2$ mA cm⁻², until the spiral wave was detached from the obstacle. The reactor was set vertically in a transparent thermostated water bath to control the temperature of the medium at 15 ± 1 °C. The bath was put between a white light source and a color CCD camera (Super-HAD, Sony) to record the images of the medium every second with a resolution of 0.1 mm pixel⁻¹.

Fig. 1 illustrates the unpinning of spiral waves from obstacles having a similar area of about 6 mm². In Fig. 1(a), the spiral wave was released from the circular obstacle, when the density of the electrical current reached a critical value $J_{unpin} = 57$ mA cm⁻². When the obstacle was changed to a rectangle of 2.3 mm $\times$ 2.6 mm in Fig. 1(b), the spiral wave was unpinned at a higher critical value

$J_{unpin} = 67$ mA cm⁻². Even more, as shown in Fig. 1(c), the unpinning for a longer rectangle of 6.5 mm $\times$ 0.9 mm occurred at a much higher critical value $J_{unpin} = 160$ mA cm⁻².

Fig. 2 shows the critical current density J_{unpin} found in experiments using circular and rectangular obstacles. As in Fig. 2(a), J_{unpin} increased with the area A of the circular obstacles. Even though they have a very similar area size, the rectangular obstacles with different width and height resulted also in different J_{unpin} values. The plot in Fig. 2(b) illustrates the relation between J_{unpin} and the circumference l . For all obstacles, J_{unpin} always increased with the circumference l , while the area A was either increased (for circles) or remained constant (for rectangles).

3. Simulations

In our numerical simulations, the two-variable Oregonator model was used to describe the dynamics of the activator u and the inhibitor v , corresponding to the concentrations of $HBrO_2$ and the catalyst in the BZ reaction, respectively. The advection terms for both u and v account for the electric field E applied in x -direction

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(u - u^2 - f v \frac{u - q}{u + q} \right) + D_u \nabla^2 u - M_u E \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= u - v + D_v \nabla^2 v - M_v E \frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \quad (1)$$

The parameter values were chosen as $\varepsilon = 0.01$, $q = 0.002$, $f = 1.4$, the diffusion coefficients $D_u = 1.0$ and $D_v = 0.6$, and the ionic mobilities $M_u = -1.0$ and $M_v = 2.0$. We used an explicit Euler method with a nine-point approximation of the two-dimensional Laplacian operator and a centered-space approximation of the gradient term with a uniform grid space $\Delta x = 0.1$ s.u. and a time step $\Delta t = 3.0 \times 10^{-3}$ t.u., as required for numerical stability ($\Delta t \leq (3/8) \Delta x^2$ [28]).

We investigated five series of obstacles. The first two series are circles and rectangles which follow the experiments: (I) nine circles with diameters of 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, and 10.0 s.u. (areas = 3.1–78.6 s.u.² and circumferences = 6.3–31.4 s.u.) and (II) six rectangles with a fixed size of area (1.70 s.u.²) and different dimensions of 1.3×1.3 , 1.7×1.0 , 3.4×0.5 , 5.4×0.3 , 8.5×0.2 and 17.0×0.1 s.u.² (circumferences = 5.2–34.2 s.u.). Similar to the circles, the third series are squares whose area and circumference simultaneously increase with the side length: (III) five squares with dimensions 3.0×3.0 , 4.5×4.5 , 6.0×6.0 , 7.5×7.5 , and 9.0×9.0 s.u.² (areas = 9.0–81.0 s.u.² and circumferences = 12.0–36.0 s.u.).

To elaborate more the effect of the obstacle area, the two last series of rectangles and ellipses were utilized: (IV) six rectangles with a fixed circumference (34 s.u.) and different dimensions of 17.0×0.1 , 16.1×1.0 , 15.1×2.0 , 13.1×4.0 , 11.1×6.0 , and 8.6×8.5 s.u.² (areas = 1.7–73.1 s.u.²), and (V) five ellipses with a fixed circumference (34 s.u.) and different dimensions of 8.5×0.56 , 8.25×1.4 , 8.0×1.98 , 7.5×2.89 , and 7.0×3.64 s.u.² (areas = 15.0–80.1 s.u.²).

For each simulation, one unexcitable obstacle was defined in the middle of the system and both boundaries of the obstacle and the system had no-flux conditions described in detail in [23]. A pinned spiral wave was initiated by stimulating a planar wave at an edge of the system. When the wave front reached the obstacle, half of the system was reset to an excitable state ($u = 0$ and $v = 0$) leading to a planar wave with one end traced the boundary of the obstacle. Subsequently, the wave front curled to form a spiral wave pinned to the obstacle. The spiral wave was allowed to propagate until its structure was stable. Similar to the experi-

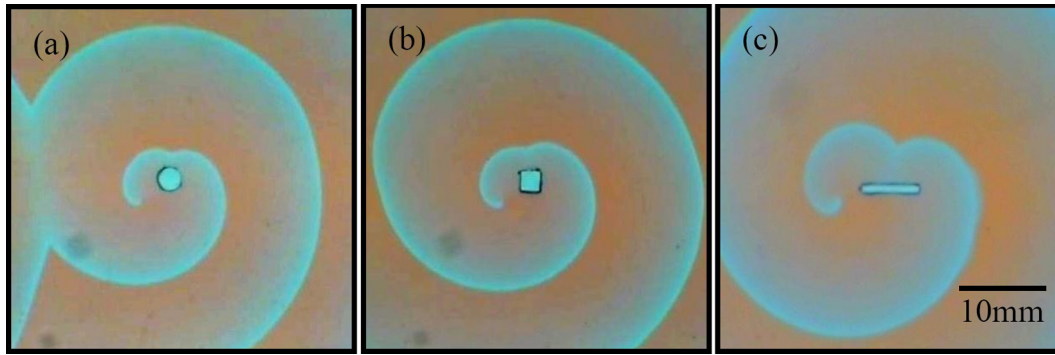


Fig. 1. Unpinning of spiral waves in the BZ reaction. The obstacles are (a) a circle with diameter 2.8 mm, (b) a rectangle of $2.3 \times 2.6 \text{ mm}^2$ and (c) a rectangle of $6.5 \times 0.9 \text{ mm}^2$. The positive and negative electrodes are located on the left and the right hand sides, respectively. In (a)–(c), $J_{\text{unpin}} = 57, 67$, and 160 mA cm^{-2} , respectively.

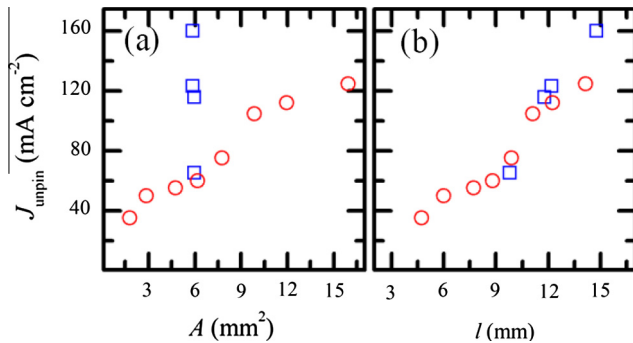


Fig. 2. The critical density J_{unpin} of electrical current for unpinning spiral waves in the BZ reaction as a function of (a) area A and (b) circumference l . Circles and rectangles represent circular and rectangular obstacles, respectively.

ments, a constant electric field was applied with a fine step of $\Delta E = 0.005$.

Examples of spiral waves released from obstacles by a critical electrical field E_{unpin} are shown in Fig. 3. The unpinning of the spiral wave occurred at $E_{\text{unpin}} = 0.695$ for the rectangle of $1.7 \times 1.0 \text{ s.u.}^2$ [Fig. 3(a)]. E_{unpin} increased to 1.655 for a longer rectangle of $8.5 \times 0.2 \text{ s.u.}^2$ [Fig. 3(b)], where both rectangles had the same area of 1.7 s.u.^2 . A circular obstacle with diameter 5.0 s.u. [Fig. 3(c)] resulted in $E_{\text{unpin}} = 1.700$ similar to the case of rectangle $8.5 \times 0.2 \text{ s.u.}^2$, but the circle had a much larger area of 19.64 s.u.^2 in comparison with both rectangles.

Fig. 4 summarizes the values of the critical electric field E_{unpin} vs. the area A [Fig. 4(a)] and the circumference l [Fig. 4(b)] for all five series of obstacles. For circular obstacles in series I ($\circ$ in Fig. 4),

E_{unpin} increased with the area as well as the circumference since rising of the circle radius resulted in simultaneous increasing of both area and circumference. Even though the rectangles in series II ($\square$ in Fig. 4) had a similar area size of 1.7 s.u.^2 , E_{unpin} ranged between 0.680 and 2.160 for different rectangles. In fact, E_{unpin} increased with the circumference. Thus, the simulations using the obstacles series I. and II. agree well with the experiments (cf. Fig. 2).

For squares in series III ($\star$ in Fig. 4), E_{unpin} increased with both the area and the circumference. Therefore, unpinning of spiral waves from the squares was very similar to the case of circles in series I. While the circumferences of rectangles in series IV (Δ in Fig. 4) as well as ellipses in series V (∇ in Fig. 4) were fixed, E_{unpin} slightly increased with the area.

To illustrate the influence of area on the unpinning and that of circumference, we consider E_{unpin} for the smallest and the largest rectangles in series II and IV in which the circumference and the area were individually varied. When the circumference of the rectangles in series II was enlarged about 5.6 times (from 5.6 to 34.2), E_{unpin} increased about 2.2 times (from 0.680 to 2.160). In contrast, when the area of the rectangles in series IV was increased about 42.3 times (from 1.7 to 73.6), E_{unpin} increased only 0.14 times (from 2.160 to 2.470). Clearly, the circumference of the obstacles play a much more important role in the unpinning of spiral waves by the electrical forcing.

4. Discussion and conclusion

We have presented an experimental investigation of the unpinning of spiral waves from unexcitable circular and rectangular obstacles by an applied electrical forcing. The results from

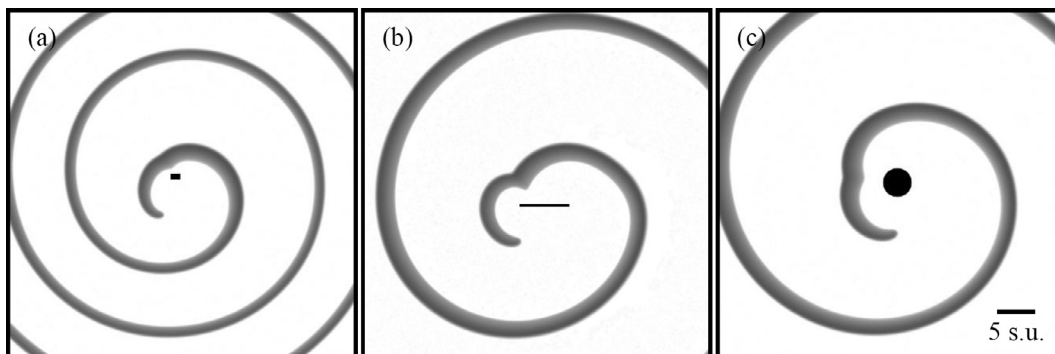


Fig. 3. Unpinning of spiral waves in the Oregonator model. The obstacles are (a) a rectangle of $1.7 \times 1.0 \text{ s.u.}^2$, (b) a rectangle of $8.5 \times 0.2 \text{ s.u.}^2$ and (c) a circle with 5.0 s.u. in diameter. The electric field points to the right. In (a)–(c), $E_{\text{unpin}} = 0.695, 1.655$ and 1.700 , respectively.

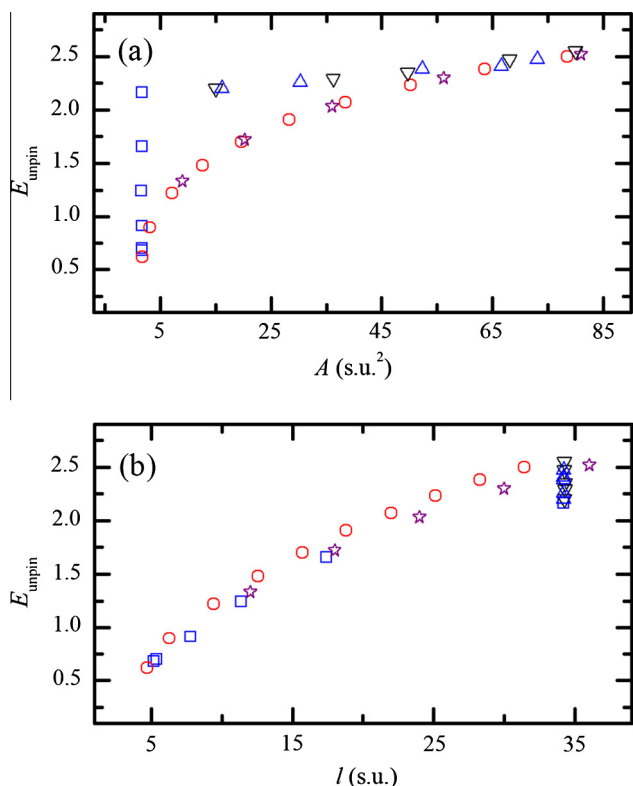


Fig. 4. Critical value E_{unpin} of electric field for unpinning spiral waves in the Oregonator model as a function of (a) area A and (b) circumference l . The symbols represent the obstacles as follows. $\circ$: circles, $\square$: fixed-area rectangles, $\star$: squares, $\triangle$: fixed-circumference rectangles, and ∇ : fixed-circumference ellipses.

experiments using the BZ reaction were reproduced in simulations using the Oregonator model. For both circular and rectangular obstacles, the critical values of electric forcing increases with the circumference and they lie approximately on the same regression curve. Therefore, our results indicate a common nature of the electrically forced unpinning from the two different forms of obstacles.

Furthermore, the simulations showed that the critical value of forcing for unpinning from square obstacles are related to the area and circumference in a very similar manner to the case of circular obstacles. For rectangular and elliptical obstacles with a given circumference, the area is only a very minor factor which influences the critical value of forcing.

Due to their radial symmetry, circular obstacles were extensively used in studies of the unpinning forced by an applied wave train and it was revealed that the wave train period for unpinning T_{unpin} decreased, when the obstacle radius increased [12–16]. Based on an analytical study, Tanaka et al. [16] showed that the circular obstacle enhanced the decrease of T_{unpin} because of an increment of the velocity of the pinned spiral wave, both in the case of hard or soft obstacles (see Eqs. (8) and (19), and Fig. 5 in [16]). Our

present study together with the previous report [25] indicated that the different shaped obstacles have a similar effect on both the pinned spiral waves and their unpinning by electrical forcing. Therefore, we expect that the unpinning by a wave train might be influenced mainly by the circumference of differently shaped obstacles. For deeper understanding the unpinning phenomena, we suggest further experiments along comparable lines: using the BZ reaction and simulations on the unpinning of spiral waves from variously shaped obstacles by applying wave trains and electrical forcing.

Acknowledgments

We thank the Department of Physics, the Faculty of Science, the Research and Development Institute (KURDI), the Center for Advanced Studies of Industrial Technology, the Graduate School, Kasetsart University, the Thailand Research Fund (Grant no. RSA5880033) and the Office of the Higher Education Commission and King Mongkut's University of Technology North Bangkok (contract no. KMUTNB-NRU-58-03) for financial support.

References

- [1] S. Nettesheim, A. von Oertzen, H.H. Rotermund, G. Ertl, *J. Chem. Phys.* 98 (1993) 9977.
- [2] F. Siegert, C.J. Weijer, *J. Cell Sci.* 93 (1989) 325.
- [3] J.M. Davidenko, A.M. Pertsov, R. Salomonz, W. Baxter, J. Jalife, *Nature* 335 (1992) 349.
- [4] A.T. Winfree, *Science* 175 (1972) 634.
- [5] J. Ross, S.C. Müller, C. Vidal, *Science* 240 (1988) 460.
- [6] A.T. Winfree, *Science* 266 (1994) 1003.
- [7] E.M. Cherry, F.H. Fenton, *New J. Phys.* 10 (2008) 125016.
- [8] I.R. Efimov, Y.N. Cheng, M. Biermann, D.R. Van Wagoner, T. Mazgalev, P.J. Tchou, *J. Cardiovasc. Electrophysiol.* 8 (1997) 1031.
- [9] A. Pumir, V. Nikolski, M. Hörning, A. Isomura, K. Agladze, K. Yoshikawa, R. Gilmour, E. Bodenschatz, V. Krinsky, *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 208101.
- [10] M. Hörning, S. Takagi, K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E* 82 (2010) 021926.
- [11] P. Bittihn, M. Hörning, S. Luther, *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012) 118106.
- [12] K. Agladze, M.W. Kay, V. Krinsky, N. Sarvazyan, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 293 (2007) H503.
- [13] A. Isomura, M. Hörning, K. Agladze, K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E* 78 (2008) 066216.
- [14] A. Pumir, S. Sinha, S. Sridhar, M. Argentina, M. Hörning, S. Filippi, C. Cherubini, S. Luther, V. Krinsky, *Phys. Rev. E* 81 (2010) 010901(R).
- [15] M. Tanaka, A. Isomura, M. Hörning, H. Kitahata, K. Agladze, K. Yoshikawa, *Chaos* 19 (2009) 043114.
- [16] M. Tanaka, M. Hörning, H. Kitahata, K. Yoshikawa, *Chaos* 25 (2015) 103127.
- [17] O. Steinbock, J. Schütze, S.C. Müller, *Phys. Rev. Lett.* 68 (1992) 248.
- [18] K.I. Agladze, P. De Kepper, *J. Phys. Chem.* 96 (1992) 5239.
- [19] A.P. Muñuzuri, V.A. Davydov, V. Pérez-Muñuzuri, M. Gómez-Gesteira, V. Pérez-Villar, *Chaos, Solitons Fract.* 7 (1996) 585.
- [20] C. Luengviriyaya, S.C. Müller, M.J.B. Hauser, *Phys. Rev. E* 77 (2008) 015201.
- [21] C. Luengviriyaya, M.J.B. Hauser, *Phys. Rev. E* 77 (2008) 056214.
- [22] M. Sutthiopad, J. Luengviriyaya, P. Porjai, B. Tomapatanaget, S.C. Müller, C. Luengviriyaya, *Phys. Rev. E* 89 (2014) 052902.
- [23] J. Luengviriyaya, M. Sutthiopad, M. Phantu, P. Porjai, J. Kanchanawarin, S.C. Müller, C. Luengviriyaya, *Phys. Rev. E* 90 (2014) 052919.
- [24] Z.A. Jiménez, Z. Zhang, O. Steinbock, *Phys. Rev. E* 88 (2013) 052918.
- [25] M. Sutthiopad, J. Luengviriyaya, P. Porjai, M. Phantu, J. Kanchanawarin, S.C. Müller, C. Luengviriyaya, *Phys. Rev. E* 91 (2015) 052912.
- [26] R.J. Field, R.M. Noyes, *J. Chem. Phys.* 60 (1974) 1877.
- [27] W. Jahnke, A.T. Winfree, *Int. J. Bif. Chaos* 1 (1991) 445.
- [28] M. Dowle, R.M. Mantel, D. Barkley, *Int. J. Bif. Chaos* 7 (1997) 2529.