พระบรมราชูปถัมภ์ สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการศึกษาเปรียบเทียบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ 2 ชนิด

จากผลการศึกษาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบความถี่สูง และแบบความถี่ต่ำยิ่งที่ทดลองสร้างขึ้นสามารถเปรียบเทียบข้อแตกต่างได้เป็น 3 ขั้น คือ ขั้นออกแบบ , ขั้นสร้างวงจร และ ขั้นทดสอบวัดผล ผลการเปรียบเทียบเป็นดังนี้

ขั้นออกแบบ

1. การเลือกความถี่ในการทำงานของหลอด

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง ใช้ความถี่สูงมากกว่า 20 kHz (เหตุผลได้กล่าวในบทที่ 2) การใช้ความถี่สูงพัฒนามาจากบัลลาสต์ธรรมดาความถี่ไฟฟ้ากำลัง 50 Hz หากเพิ่มความถี่ในการทำงานของหลอดจะสามารถลดขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ใช้จำกัดกระแสผ่านหลอด ให้มีขนาดเล็กลงได้ ซึ่งจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานต่ำและสามารถประหยัดพลังงานได้ส่วนหนึ่ง อีกทั้งการใช้ความถี่สูงจะทำให้ค่าประสิทธิผลการส่องสว่างของหลอดเพิ่มสูงขึ้น อันเป็นการช่วยประหยัดพลังงาน และช่วยยืดอายุการใช้งานของหลอดได้ การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงได้รับความนิยมมาก เพราะจะง่ายในการออกแบบสร้างแรงดันกระแสสลับป้อนให้หลอด ทำให้หลอดทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ เช่น โดยการใช้วงจรแบบกึ่งบริดจ์สร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง (R.J.Haver,1987) และง่ายในการออกแบบการจุดหลอดเพราะหลอดไม่ต้องการการจุดหลอดซ้ำ(re-ignition) จึงใช้วงจรเรโซแนนซ์ความถี่สูงที่มีอุปกรณ์น้อยก็เพียงพอแล้วในการจุดหลอด

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่ต่ำยิ่ง ใช้หลักการป้อนแรงดันกระแสตรงให้หลอด แล้วกลับขั้วหลอดทุกระยะเวลาที่ตั้งไว้ คิดเป็นความถี่ต่ำยิ่ง 69 μHz - 66 mHz (วงจรตั้งเวลาที่ทดลองสร้างขึ้นสามารถตั้งเวลาได้นาน 15 วินาที ถึง 4 ชั่วโมง) โดยเป็นวงจรที่พัฒนามาจากหลักการของวงจรยืดอายุหลอดฟลูออเรสเซนต์ (มงคล เดชนครินทร์ , 2531 , 2532) หรือ วงจรแทนบัลลาสต์แบบกระแสตรง (มงคล เดชนครินทร์ , 2525, 2528) ที่ใช้การเรียงแรงดันกระแสสลับจากบัลลาสต์ธรรมดา ให้เป็นแรงดันกระแสตรง ป้อนให้หลอดที่ไส้หลอดขาด 1 ข้าง ก็ยังคงใช้ได้ แต่การออกแบบป้อนแรงดันกระแสตรงเรียบให้หลอด โดยให้หลอดทำงานอย่างมีเสถียรภาพจะยาก เช่น การจุดหลอดใช้เพียงพลังงานสูงชั่วขณะไปกระตุ้นจะไม่เพียงพอที่จะทำให้หลอดจุดติดได้ ต้องใช้กระแสอุ่นไส้ช่วยเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจึงจะจุดหลอดติด , การควบคุมกระแสตรงผ่านหลอดให้มีเสถียรภาพทำได้ยากกว่าวงจรกระแสสลับ เพราะหากใช้ตัวต้านทานจำกัดกระแสก็จะมีการสูญเสียกำลังมากกว่าการใช้ตัวเหนี่ยวนำ , การสร้าง

วงจรกลับขั้วความถี่ต่ำเพื่อให้ไส้หลอดมีการสึกหรอเท่า ๆ กันทั้ง 2 ขั้ว หากใช้วงจรกลับขั้วแบบอิเล็กทรอนิกส์จะต้องใช้ทรานซิสเตอร์จำนวนมาก และวงจรกลับขั้วซับซ้อนมาก การเลือกใช้รีเลย์แบบสองขั้วสองทาง (DPDT) เป็นอุปกรณ์กลับขั้ว จะทำให้มีวงจรกลับขั้วมีความซับซ้อนน้อยกว่า แต่ก็มีปัญหาจากเวลาการเปิด-ปิดหน้าสัมผัสของรีเลย์จะนานไม่เท่ากันจึงทำให้ไส้หลอดมีการเสื่อมไม่เท่ากันทั้ง 2 ข้าง ในด้านการใช้งานหลอดจะทำงานในลักษณะโหลดไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้รีเลย์กลับขั้วหลอดตามคาบเวลาที่ตั้งไว้ จึงไม่เกิดปรากฏการณ์สโตรโบสโคปิกที่ความถี่ต่ำ หรือที่ความถี่สูงเลย จึงสามารถใช้ในงานถ่ายภาพที่ต้องการแสงนิ่งได้ แต่ก็มีข้อเสีย คือจะสังเกตเห็นแสงกะพริบขณะรีเลย์กลับขั้ว

2. การเลือกวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟเพื่อให้กระแสด้านเข้ามีรูปคลื่นใกล้ไซน์

วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟในบัลลาสต์ความถี่สูง เลือกใช้วงจรทบระดับ(boost) เพื่อต้องการสร้างแรงดันสูงให้แก่วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง เพื่อจะได้ยังคงมีแรงดันสูงมากพอที่จะจุดหลอด และจ่ายไฟเลี้ยงหลอดได้ (แรงดันต้องมากกว่าแรงดันคร่อมหลอด)

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง เลือกใช้วงจรทอนทบระดับ (buck-boost) เพื่อต้องการลดแรงดันจากวงจรเรียงกระแสให้มีค่าต่ำลงใกล้เคียงแรงดันแซดเดิลของหลอด แต่การทำงานของวงจรทอนทบระดับจะทำให้กระแสด้านเข้าไม่ต่อเนื่อง หากเพิ่มวงจรกรองแบบ LC เพื่อทำให้กระแสต่อเนื่องจะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุค่าใหญ่

<u>ขั้นสร้างวงจร</u>

1. จำนวนชิ้นส่วนวงจรและราคา

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง มีอุปกรณ์ 67 ชิ้น (ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว , ตัวต้านทาน 23 ตัว , ตัวเก็บประจุ 19 ตัว, ไอซี 1 ตัว, ไดโอด 15 ตัว , ตัวเหนี่ยวนำ/หม้อแปลง 5 ตัว) ในประเด็นด้านราคาบัลลาสต์ความถี่สูงที่ใช้ไอซีควบคุมจะมีต้นทุนสูง (โดยประมาณเท่ากับ 700 บาท) จึงอาจเป็นอุปสรรคต่อการนำไปผลิตใช้งาน

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง มีอุปกรณ์ 82 ชิ้น (ทรานซิสเตอร์ 3 ตัว , ตัวต้านทาน 32 ตัว , ตัวเก็บประจุ 23 ตัว, ไอซี 4 ตัว, ไดโอด 16 ตัว , ตัวเหนี่ยวนำ/หม้อแปลง 2 ตัว , รีเลย์ 1 ตัว , สวิตช์เลือกปรับตั้งเวลา 1 ตัว) วงจรมีอุปกรณ์มากกว่าบัลลาสต์ความถี่สูง เพราะวงจรกลับขั้วของบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่งจะใช้จำนวนอุปกรณ์มากกว่าวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง การมีอุปกรณ์มากกว่าจึงทำให้ความน่าเชื่อถือได้ของระบบต่ำกว่าและต้นทุนก็สูงมาก (โดยประมาณราว 800 บาท) แพงกว่าบัลลาสต์ความถี่สูง

วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง กับความถี่ต่ำยิ่ง จะมีจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ใกล้เคียงกัน แต่วงจรกลับขั้วสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำยิ่งจะใช้จำนวนอุปกรณ์มากกว่าวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง

2. ขนาดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง มีขนาดใหญ่กว่าบัลลาสต์ทั่วไป โดยวงจรประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ วงจรกรอง ฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ และวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง ถึงแม้ว่าวงจรแบบความถี่สูงจะใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ก แต่ก็ต้องมีวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง จึงทำให้ขนาดบัลลาสต์ส่วนสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูงมีขนาดใกล้เคียง กับบัลลาสต์ธรรมดา แต่เมื่อรวมกับวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟจึงทำให้บัลลาสต์มีขนาดประมาณ 2 เท่าของบัลลาสต์ธรรมดา

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง มีขนาดใหญ่กว่าบัลลาสต์ความถี่สูง เพราะการใช้ความถี่ต่ำจึงใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนทบระดับมีขนาดใหญ่ และ วงจรกลับขั้วที่ใช้รีเลย์ก็มีขนาดใหญ่กว่าวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง (อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง)

3. ความยากง่ายในการสร้าง

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง การสร้างวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟที่ใช้ไอซีควบคุม จำเป็นต้องศึกษาขั้นตอนการทำงานและรายละเอียดการใช้ไอซีให้ดี มิฉะนั้นอาจพลาดพลั้งทำให้ไอซีเสียหายได้ ถึงแม้ว่าการใช้ไอซีจะมีความยุ่งยากบ้างแต่ก็สะดวกกว่าการสร้างวงจรควบคุมเอง ส่วนการสร้างวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูงสามารถทำได้ไม่ยากนัก เพราะมีบทความที่มีผู้วิจัยศึกษาบัลลาสต์หลักการความถี่สูงอยู่เป็นจำนวนมาก แต่จะยากที่การทำให้วงจรมีกำลังสูญเสียต่ำที่สุด และให้วงจรสามารถทนต่อสภาวะใช้งานต่าง ๆ เช่น ทนแรงดันเกินได้

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง การสร้างวงจรจุดหลอดทำได้ยากในการจุดหลอดติด ส่วนวงจรกลับขั้วความถี่ต่ำยิ่งก็จะต้องทำให้หลอดไม่ดับเมื่อกลับขั้ว และต้องมีการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านไส้หลอดให้ไม่สูงมากไปจนทำให้ไส้หลอดขาด กล่าวโดยรวมจะมีความยากในการสร้างมากกว่าบัลลาสต์ความถี่สูง

<u>ขั้นทดสอบวัดผล</u>

1. รูปคลื่นกระแสด้านเข้าบัลลาสต์

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง กระแสด้านเข้าต่อเนื่องรูปใกล้ไซน์ ดังรูปที่ 4.2

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง กระแสด้านเข้าไม่ต่อเนื่อง มีเอนเวโลปรูปไซน์ ดังรูปที่ 4.4

2. รูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอด

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง ให้แรงดันคร่อมหลอดเป็นแรงดันกระแสสลับความถี่สูง การที่อิเล็กตรอนภายในหลอดวิ่งไปมาภายในหลอด ทำให้หลอดทำงานในลักษณะพลวัต ไม่เข้าสู่ภาวะคงตัวของหลอด(ระยะแซดเดิล) หลอดจึงแสดงคุณสมบัติคล้ายตัวต้านทาน ที่ต้องการการจุดหลอดเพียงครั้งแรกเท่านั้น ไม่ต้องการแรงดันจุดหลอดซ้ำ เราจึงสามารถออกแบบแปรเปลี่ยนค่าแรงดันคร่อมหลอดได้ ทำให้สะดวกต่อการออกแบบบัลลาสต์ที่สามารถแปรเปลี่ยนค่ากำลังที่หลอดให้ต่ำลงเพื่อประหยัดพลังงาน หรือเพื่อการปรับหรี่แสงได้

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำยิ่ง (แรงดันกระแสตรงที่สลับขั้วเป็นคาบเวลาที่ยาวนาน) หลอดทำงานคล้ายวงจรบัลลาสต์ธรรมดา แต่ถูกยืดเวลาการกลับขั้วหลอดให้นาน ออกไป จึงทำให้หลอดมีการทำงานในช่วงแซดเดิลนานมากขึ้น หลอดจึงทำงานในลักษณะอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ยากในการออกแบบการปรับควบคุมค่ากระแส และกำลังที่หลอด ส่วนการปรับกำลังที่หลอดให้ต่ำลงเพื่อประหยัดพลังงานนั้นอาจทำได้ ถ้าสามารถออกแบบให้หลอดยังคงทำงานได้โดยลำอาร์กไม่ขาดเสถียรภาพ (คือไม่เกิดการดับของหลอด) ส่วนการจุดหลอดนั้น เมื่อหลอดทำงานลักษณะอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องการการจุดหลอดซ้ำทุกครั้งที่กลับขั้ว แต่วงจรกลับขั้วจะถูกตั้งเวลาให้มีการกลับขั้วน้อยครั้งกว่าบัลลาสต์ธรรมดาจึงจะมีการจุดหลอดซ้ำน้อยครั้งกว่า อันหมายถึงสามารถประหยัดพลังงานในช่วงจุดหลอดซ้ำ และอาจช่วยยืดอายุใช้งานของหลอดได้ (แต่บัลลาสต์ความถี่สูงจะยืดอายุการใช้งานของหลอดได้มากกว่า เพราะไม่มีการจุดหลอดซ้ำ)

3. รูปคลื่นกระแสผ่านหลอด

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูงสามารถออกแบบให้กระแสผ่านหลอดมีค่าตัวประกอบยอดคลื่น (crest factor) ได้ต่ำเท่ากับกรณีรูปคลื่นไซน์ (มีค่า 1.414) ซึ่งจะทำให้มีการเสื่อมของไส้หลอดน้อย และการอาร์กมีเสถียรภาพดีมากที่สุด (Byszewski , 1990)

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง เป็นบัลลาสต์ที่มีค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสผ่านหลอดมีค่าต่ำที่สุด (คือ ประมาณ 1.0) จึงทำให้มีการกระจายความร้อนในไส้หลอดอย่างสม่ำเสมอมากที่สุดที่ ในทางทฤษฎีจะสามารถช่วยลดการสึกหรอของไส้หลอดลงได้ แต่ก็มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพของลำอาร์ก เช่น หากแรงดันแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น กระแสอาร์กก็จะเพิ่มขึ้นอย่างทันที โดยสังเกตได้ชัดจากปริมาณแสงที่สว่างเพิ่มขึ้นทันทีทันใด ซึ่งการที่หลอดมีความไวต่อกระแสมากอาจเพิ่มการสึกหรอของไส้หลอดได้ (E. Rasch , 1989)

4. ความคาดหวังด้านความสว่างของหลอด

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง จากทฤษฎีการทำงานของหลอด การให้หลอดทำงานที่ความถี่สูง ทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งจากไส้หลอดด้านหนึ่งไปยังไส้หลอดอีกด้าน แต่ยังวิ่งไปไม่ถึง เมื่อเกิดการกลับขั้วของแรงดันคร่อมหลอดความถี่สูงทำให้อิเล็กตรอนต้องวิ่งกลับ จึงทำให้อิเล็กตรอนส่วนหนึ่งวิ่งไปไม่ถึงไส้หลอด แต่วิ่งไปวิ่งมาอยู่ภายในหลอด จึงลดการสึกหรอของไส้หลอด และ เพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในลำอาร์กช่วยเพิ่มความสว่าง อีกทั้ง อิเล็กตรอนที่วิ่งโดยส่วนใหญ่จะวิ่งในแนวทางตรง โดยมีการกระจายเบี่ยงเบนออกด้านข้างน้อย จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นของลำอิเล็กตรอนบริเวณใจกลางลำอาร์กได้ อันเป็นการช่วยเพิ่มความสว่างได้มากขึ้น ข้อดีในการใช้งานความถี่สูง คือ ไม่เกิดปรากฏการณ์สโตรโบสโคปิกที่ความถี่ต่ำ ดังนั้นตาคนจึงมองเห็นแสงสว่างต่อเนื่อง แต่หลอดยังคงมีการกะพริบที่ความถี่สูง นั่นคือยังคงมีผลจากสโตรโบสโคปิกที่ความถี่สูงที่อาจมีผลต่อการใช้เครื่องมือบางอุปกรณ์ เช่นเครื่อง Scanner ที่มีการใช้กล้องถ่ายภาพตรวจลักษณะโลหะ (E.E. Hammer , 1985)

ในกรณีของวงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง หลอดทำงานที่ความถี่ต่ำยิ่ง จากทฤษฎีความถี่ขนาดนี้จะทำให้การวิ่งของอิเล็กตรอนภายในหลอดวิ่งเป็นเส้นตรงในแนวทางตรง ที่มีการเบี่ยงเบนแนวทางวิ่งน้อยจึงเป็นลักษณะประการหนึ่ง ที่จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนบริเวณใจกลางลำอาร์กอันจะช่วยเพิ่มความสว่างได้ แต่จากการที่ไส้หลอดขั้วหนึ่งปล่อยอิเล็กตรอนเป็นเวลานาน และไส้หลอดอีกขั้วก็รับอิเล็กตรอนเป็นเวลานาน (ระยะเวลานานเท่าใดขึ้นกับเวลาที่ตั้งไว้ เช่น 10 นาที) จึงอาจมีผลทำให้ไส้หลอดสึกหรอได้เร็ว เกิดปัญหาขั้วหลอดดำเร็ว (blackening effect) (Byszewski , 1990)

5. ความคาดหวังด้านอายุการใช้งาน

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง วงจรอินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันกระแสสลับไม่มีปัญหาการเสียของชิ้นส่วนเซิงกล แต่อาจเสียหายได้หากได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงเกินพิกัด ส่วนหลอดจะมีอายุการใช้งานของหลอดเพิ่มได้นานขึ้นกว่าวงจรบัลลาสต์ธรรมดาหากกระแสผ่านหลอดมีรูปใกล้ไซน์ และมีการปรับลดกระแสผ่านหลอด(ลดกำลังที่หลอด) และ ให้หลอดทำงานในลักษณะตัวต้านทานที่ความถี่สูง ก็จะลดการสึกหรอของไส้หลอดช่วยเพิ่มอายุใช้งานของหลอดได้

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง วงจรกลับขั้วความถี่ต่ำ สามารถทนแรงดันเกินจากการใช้งานได้ แต่อาจมีปัญหารีเลย์กลับขั้วเสียได้จากหน้าสัมผัสอาร์กติดกัน ส่วนอายุการใช้งานของหลอด ผลการศึกษายังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่งจะสามารถทำให้หลอดมีอายุใช้งานเพิ่มได้นานขึ้นหรือไม่ เพราะหลอดทำงานในลักษณะโหลดไฟฟ้ากระแสตรงจึงอาจทำให้ไส้หลอดสึกหรอมากขึ้น แต่การที่หลอดทำงานโดยมีค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสผ่านหลอดต่ำที่สุด คือ มีค่าประมาณ 1 จึงช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอในการกระจายความร้อนของไส้หลอด ลดการสึกหรอของไส้หลอด อีกทั้งการมีหม้อแปลงอุ่นไส้หลอดช่วยเพิ่มอุณหภูมิ

ของไส้หลอด ลักษณะคล้ายการทำงานของหลอดแรปิดสตาร์ตก็น่าจะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของหลอดได้ และหลอดทำงานโดยมีจำนวนครั้งในการจุดหลอดซ้ำน้อยกว่าวงจรบัลลาสต์ธรรมดา จึงน่าจะมีการสึกหรอของไส้หลอดขณะจุดหลอดน้อยกว่า (E.E.Hammer 1989)

6. ประสิทธิภาพของบัลลาสต์

วงจรบัลลาสต์ความถี่สูง มีประสิทธิภาพ ประมาณ 89 - 91 % เพราะมีการสูญเสียกำลังในวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ และวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง

วงจรบัลลาสต์ความถี่ต่ำยิ่ง มีประสิทธิภาพ ประมาณ 75 - 78 % ถึงแม้ว่าจะสามารถประหยัดพลังงานจากการไม่มีการสูญเสียในสวิตช์ของวงจรสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูง แต่ก็มีการสูญเสียกำลังในความต้านทานจำกัดกระแส ในหม้อแปลงอุ่นไส้ และการใช้แรงดันความถี่ต่ำยิ่งจะมีการสูญเสียกำลังในอุปกรณ์และไส้หลอดสูงกว่าการใช้แรงดันความถี่สูง

7. ความเป็นไปได้ในการใช้งาน

วงจรความถี่สูงมีความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง และก็มีผู้ใช้อยู่บ้างแล้ว

วงจรความถี่ต่ำยิ่งยังมีปัญหาในเรื่อง เสถียรภาพในการคุมค่ากระแสตรงผ่านหลอด การจุดหลอด และแนวทางการใช้ประโยชน์ของการป้อนแรงดันกระแสตรงให้หลอดที่ยังต้องการการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมอีก