

## การพัฒนาโมดูลขยายคลื่นวิทยุแบบpush-pull ความถี่ 118 เมกะเฮิรตซ์ กำลัง 300 วัตต์ ประสิทธิภาพสูง

ธรรมบุญ ศรีน่วม<sup>1</sup> พันธุ์ศักดิ์ เกิดทองมี<sup>2</sup> สัมภาส ฉืดเกตุ<sup>3</sup> และ หมุดต่อเล็บ หนิสอ<sup>4</sup>  
ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาเพื่อการประยุกต์ทางกลีกรรม  
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ เลขที่ 222 ต.ไทยบุรี อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช 80160

### บทคัดย่อ

โมดูลขยายกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 118 เมกะเฮิรตซ์ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นโมดูลย่อยของวงจรขยายแบบโมดูลสำหรับเครื่องเร่งอนุภาค ภายในโมดูลประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วนคือ บาลัน วงจรขยายคลาส-บี และวงจรแมตชิ่งเน็ตเวิร์ค ที่ต่อเข้าด้วยกันเพื่อการขยายสัญญาณแบบpush-pull โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรและโครงสร้างทางกายภาพของแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกออกแบบจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ก่อนประกอบวงจรจริงเพื่อให้ได้การส่งผ่านกำลังสูงสุดและมีความถูกต้องสูงตามลำดับ

ผลการประกอบวงจรและทำการทดลองพบว่า โมดูลมีการขยายเชิงเส้นที่อัตราขยายช่วง 27-28 เดซิเบล เมื่อจ่ายกำลังเอาต์พุตช่วง 30-220 วัตต์ และมีอัตราขยายลดลง เมื่อจ่ายกำลังสูงขึ้น โมดูลขยายมีประสิทธิภาพรวม (PAE) ไม่คงที่ต่อกำลังเอาต์พุตโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20-72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจ่ายกำลังเอาต์พุต 30-320 วัตต์ และมีอัตราขยายเท่ากับ 24 เดซิเบล เมื่อจ่ายกำลังสูงสุด

รายละเอียดต่างๆ ของการพัฒนาโมดูลขยาย เช่น หลักการทำงานและการกำหนดจุดทำงานของวงจรขยาย การออกแบบวงจรแมตชิ่งเน็ตเวิร์ค รายละเอียดของการประกอบและปรับแต่งวงจร และเทคนิคการวัดกำลังเอาต์พุต เพื่อให้โมดูลขยายมีประสิทธิภาพและสามารถจ่ายกำลังได้สูงสุด จะถูกอธิบายไว้ในงานวิจัยนี้

**คำสำคัญ :** BALUN / Push-pull / RF Amplifier / Solid state Amplifier / VHF RF Amplifier

\* Corresponding author. Email: d.srinoum@hotmail.com

1 นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์

2 นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์

3 นักฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาค สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

4 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์

## Development of High-Efficiency RF Amplifier 118 MHz 300 W Module

Dhammanoon Srinoum<sup>1\*</sup>, Pansak Kerdongmee<sup>2</sup> Sampart Cheedket<sup>3</sup> and Mudtorlep Nisoa<sup>4</sup>

Plasma Technology for Agricultural Applications Research Unit, School of Science, Walailak University,  
Nakhon-Si- Thammarat, 80160, Thailand

### Abstract

RF amplifier module working frequency at 118 MHz has been developed as a sub module of a modular type amplifier for particles acceleration. The module consist of three major parts: BALUN, class-B amplifier and matching network connecting for a push-pull topology with their lump parameters and physical dimensions of a printer circuit board are computerized calculations for maximum power transferring and high precision respectively. For the completed module, experiment shows, the module has linear amplification at its gain about 28-27 dB within 30-220 Watt output power range while decreasing amplification for higher power output. The PAE varies from 20 to 72% depending on output power of 30 to 320 Watt. The gain of 24 dB is obtained at maximum output power.

In this paper, we carefully designed and optimized the amplifier to get highest efficiency and maximum output power. The some important details such as circuit topology and design, MOSFET biasing method, tuning of matching network and power measurement technique will be shown.

**Keywords :** BALUN / Push-pull / RF Amplifier / Solid state Amplifier / VHF RF Amplifier.

---

\* Corresponding author. Email: d.srinoum@hotmail.com

<sup>1</sup> Master of Science Student, School of Science, Walailak University.

<sup>2</sup> Ph.D. Candidate Student, School of Science, Walailak University.

<sup>3</sup> Accelerator Physicist, Synchrotron Light Research Institute (Public Organization).

<sup>4</sup> Assistant Professor, School of Science, Walailak University.

## 1. บทนำ

คลื่นวิทยุ (RF: Radio frequency wave) ไม่เพียงแต่ถูกประยุกต์ใช้เฉพาะด้านการสื่อสารเท่านั้นแต่ยังถูกนำไปใช้ในศาสตร์สาขาต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ในการวิเคราะห์ MRI ทางการแพทย์ ใช้ในการเร่งอนุภาคใช้ในการให้ความร้อนกับวัสดุแบบขดลวดเหนียวน้ำ และใช้ในการกำเนิดพลาสมาชนิดต่างๆ เป็นต้น ส่งผลให้ทั้งความถี่และพิกัดกำลังของคลื่นวิทยุมีความหลากหลายต่อการประยุกต์ใช้ เช่น คลื่นความถี่ 118 เมกะเฮิรตซ์ พิกัดกำลัง 30 กิโลวัตต์ถูกใช้ในการเร่งอนุภาคที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) [1] คลื่นความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ พิกัดกำลัง 1 กิโลวัตต์ ใช้ในการกำเนิดพลาสมาในการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำ [2] หรือคลื่นช่วงความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 500 กิโลเฮิรตซ์ พิกัดกำลัง 500 วัตต์ถูกใช้ในการพัฒนาเครื่องกำเนิดไอโซนแบบ Barrier discharge เป็นต้น [3] ได้แต่ที่ว่าเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุที่มีพิกัดกำลังสูงระดับหลายร้อยวัตต์และทำงานที่ความถี่ที่ต้องการโดยเฉพาะในย่านความถี่สูงมาก (VHF) ยังไม่มีการพัฒนาอย่างแพร่หลายในประเทศไทย จึงต้องนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง และส่งผลให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคลื่นวิทยุในประเทศไทยน้อยมาก

ก่อนทศวรรษผ่านมามากการกำเนิดคลื่นวิทยุที่มีพิกัดกำลังสูงโดยทั่วไปจะใช้หลอดสุญญากาศเป็นอุปกรณ์ขยายกำลัง ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านต่างๆ เช่น ต้องใช้เวลาในการเผาไส้หลอด และไส้หลอดมีอายุการใช้งานที่จำกัดต้องเปลี่ยนหลอดใหม่เป็นระยะๆ ทำให้มีต้นทุนในการสำรองอุปกรณ์ที่สูง อีกทั้งต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงในการไบอัสส่งผลให้ระบบมีความซับซ้อนและมีความยืดหยุ่นต่ำในการซ่อมบำรุง

ณ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้การพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณ เช่น มอสเฟตและทรานซิสเตอร์ สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงและรองรับการจ่ายกำลังได้สูงขึ้นระดับหลายร้อยวัตต์โดยมีขนาดเล็กกลงหลายเท่าตัวและมีราคาต่ำลงอย่างมากเนื่องจากมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีขีดจำกัดเรื่องพิกัดกำลัง (ระดับร้อยวัตต์) จึงทำให้ในการขยายสัญญาณ

คลื่นวิทยุเพื่อให้ได้พิกัดกำลังระดับหลายกิโลวัตต์ จำเป็นต้องสร้างวงจรขยายแบบโมดูลย่อยที่มีพิกัดกำลังต่ำก่อนแล้วนำกำลังเอาต์พุตของแต่ละโมดูลมารวมกัน ซึ่งเรียกววงจรขยายชนิดนี้ว่าวงจรขยายแบบโมดูลลาร์ (Modular solid state power amplifier)

ในงานวิจัยครั้งนี้จะพัฒนาโมดูลขยายความถี่ 118 เมกะเฮิรตซ์ที่มีกำลังเอาต์พุตและประสิทธิภาพรวมของวงจร PAE (Power added efficiency) [4] สูงกว่า 300 วัตต์และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นโมดูลย่อยของวงจรขยายแบบโมดูลลาร์ขนาดพิกัดกำลัง 2 กิโลวัตต์เพื่อใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค

สำหรับโมดูลย่อยที่ได้พัฒนาขึ้นจะใช้หลักการทำงานของวงจรขยายแบบพุช-พูล (Push-pull amplifier) [5] ซึ่งภายในโมดูลประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญได้แก่ อินพุต-เอาต์พุตบาลัน อินพุต-เอาต์พุตแมตซ์ซิ่งเน็ตเวิร์ค และส่วนขยายกำลังคลาส-บี เป็นต้น โดยรายละเอียดของหน้าที่และหลักทำงานของแต่ละภาคส่วน การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ และการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้วงจรมี PAE และจ่ายกำลังได้สูงสุด จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

## 2. ทฤษฎีเบื้องต้น

### 2.1 ประสิทธิภาพและการกำหนดจุดทำงานของวงจรขยายคลาส-บี

ประสิทธิภาพ  $\eta$  ของวงจรขยายคลาสต่างๆ จะขึ้นอยู่กับมุมในการนำกระแส  $\theta$  (หน่วยเป็นองศาเรเดียน) ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ [4]

$$\eta = \frac{\theta - \sin \theta}{2 \left[ \theta \cos \left( \frac{\theta}{2} \right) - 2 \sin \left( \frac{\theta}{2} \right) \right]} \quad (1)$$

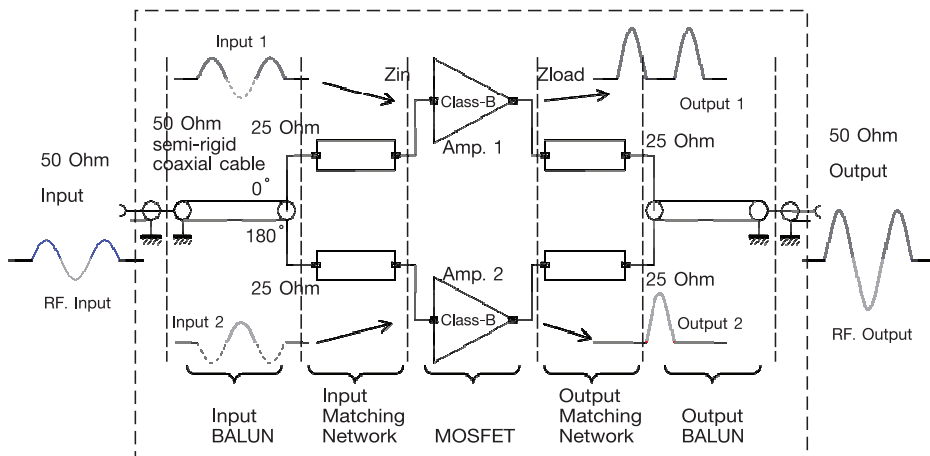
จากสมการ (1) หากมุมในการนำกระแสเป็นศูนย์ (วงจรขยายคลาส-ซี) ส่งผลให้  $\eta$  เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่วงจรขยายคลาสนี้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตสูงมาก [4, 6] สำหรับวงจรขยายคลาส-บี ซึ่ง  $\theta = 180$  องศา จะได้  $\eta = 78.5$  เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพรองลงมาจากวงจรขยายคลาส-ซี แต่

วงจรขยายคลาส-บี จะให้ความถูกต้องของสัญญาณและจ่ายกำลังเอาต์พุตได้สูง ด้วยเหตุนี้วงจรขยายคลาส-บี จึงถูกเลือกใช้สำหรับการขยายคลื่นวิทยุในครั้งนี้อยู่ประกอบวงจรให้มีการทำงานเป็นวงจรขยายแบบพุช-พูลดังกล่าวข้างต้น

แต่ในทางปฏิบัติวงจรขยายสัญญาณคลาส-บี จะต้องมีส่วนประกอบต่างๆ เพิ่มขึ้นหลายส่วน ทำให้การปรับ  $\theta$  เพื่อให้ได้ 180 องศาทำได้ยากเนื่องจากอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรสามารถเปลี่ยนค่าไปสู่ค่าที่ทำให้ PAE ลดต่ำลง โดยทั่วไปแล้ว PAE ของวงจรขยายคลาส-บี จะมีค่าประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ ในย่านความถี่ VHF เมื่อจ่ายกำลังเอาต์พุตไม่เกิน 350 วัตต์ [7],[8],[9],[10],[11],[12] ดังนั้นในการพิจารณาถึงการกำหนดจุดทำงานของวงจรจะต้องเลือกจุดทำงานที่ให้ PAE สูงสุดเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นโดยส่วนใหญ่  $\theta$  จึงถูกกำหนดให้ใกล้เคียงกับ 180 องศามากที่สุด

## 2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรขยายแบบพุช-พูล

วงจรขยายแบบพุช-พูล มีหลักการทำงานคือสัญญาณคลื่นที่เข้ามาด้านอินพุตของวงจรจะถูกแบ่งกำลังออกเป็นสองส่วน (Input1 และ Input2) แสดงในรูปที่ 1 เพื่อนำไปขยายด้วยวงจรขยายคลาส-บี ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน 2 ชุด (Amp.1 และ Amp.2) เนื่องจากวงจรขยายคลาส-บีจะขยายสัญญาณได้เฉพาะด้านบวกเท่านั้น (สังเกตเส้นทึบของ Input1 และ Input2) ดังนั้นสัญญาณอินพุตทั้งสองจึงต้องถูกทำให้เฟสให้ต่างกัน 180 องศาเพื่อการขยายสำหรับครึ่งรูปคลื่นแรก ( $0 < \omega t < \pi$ ) ของ Input1 และครึ่งรูปคลื่นที่สอง ( $\pi < \omega t < 2\pi$ ) ของ Input2 ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณทั้งสองที่ถูกขยายแล้วจะถูกรวมกลับเข้าด้วยกันจนเต็มรูปคลื่นอีกครั้งก่อนที่จะส่งออกทางด้านเอาต์พุตต่อไป ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรขยายแบบพุช-พูล สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้



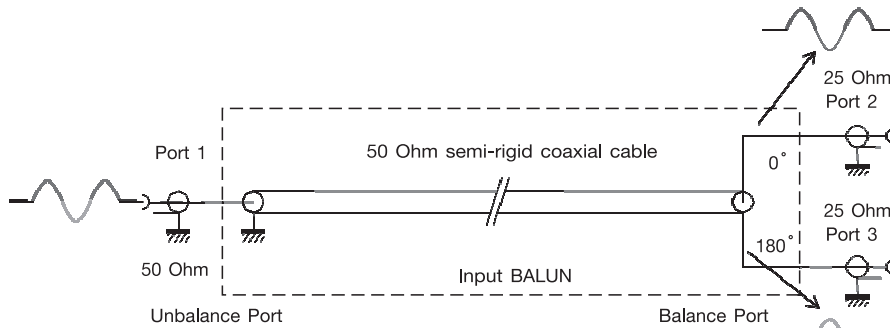
รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจรขยายคลื่นวิทยุแบบพุช-พูล

### 2.2.1 บาลัน (BALUN : BALANCE UNbalance)

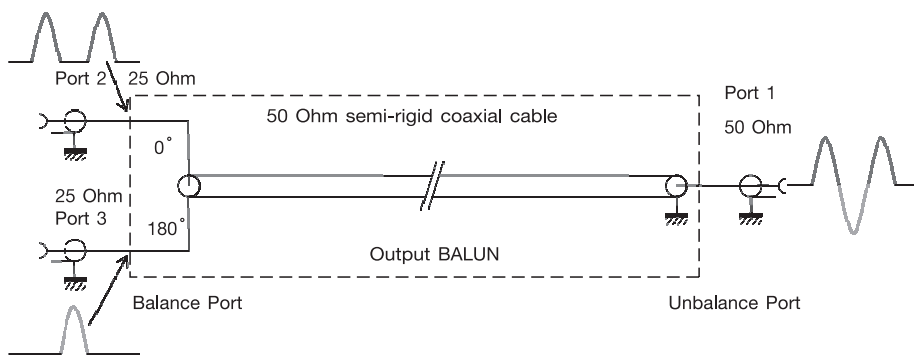
- อินพุตบาลัน (Input BALUN) ทำหน้าที่แบ่งกำลังคลื่นอินพุตออกเป็นสองส่วน (Input1 และ Input2) และกลับเฟสของทั้งสองส่วนให้ต่างกัน 180 องศาเพื่อส่งไปขยายด้วยวงจรขยาย 2 ชุด อินพุตบาลันจะประกอบด้วยพอร์ต (Port) ทั้งหมด 3 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 2 ก. โดยที่พอร์ตที่ 1 เป็นด้านอินพุต เรียกว่าพอร์ตอันบาลานซ์ (Unbalance port) ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ  $(50+j0)$  โอห์ม ส่วนพอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นด้านเอาต์พุตเรียกว่า

พอร์ตบาลานซ์ (Balance port) โดยทั้งสองพอร์ตนี้จะต้องถูกสร้างให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $(25+j0)$  โอห์ม

- เอาต์พุตบาลัน (Output BALUN) มีโครงสร้างคล้ายกับอินพุตบาลันแต่จะทำหน้าที่ในการรวมคลื่นวิทยุที่ถูกขยายโดย Amp.1 และ Amp.2 เข้าด้วยกันใหม่อีกครั้งให้เป็นรูปคลื่นที่สมบูรณ์ และแปลงค่าอิมพีแดนซ์จาก  $(25+j0)$  โอห์ม จากพอร์ตอินพุตทั้งสองให้เป็น  $(50+j0)$  โอห์มที่พอร์ตเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 2 ข.



ก)



ข)

รูปที่ 2 โครงสร้างของอินพุตบาลัน ก) และเอาต์พุตบาลัน ข)

### 2.2.2 วงจรขยายคลาส-บี (Class-B Amplifier)

เนื่องจากการขยายสัญญาณแบบพุช-พูลจะต้องใช้วงจรขยายคลาส-บี จำนวน 2 ชุด (Amp.1 และ Amp.2 ในรูปที่ 1) ทำหน้าที่ขยายรูปคลื่นสัญญาณที่ออกจากพอร์ตที่ 2 และ 3 ของอินพุตบาลันชุดละครึ่งรูปคลื่น โดย Amp.1 จะขยายช่วง  $0 < \omega t < \pi$  และ Amp.2 จะขยายช่วง  $\pi < \omega t < 2\pi$  สำหรับหนึ่งลูกคลื่นสลับกันเป็นเช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้นวงจรขยายคลาส-บีทั้งสองจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน โดยจะใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบอร์ SR746 [13] ซึ่งภายในประกอบด้วยมอสเฟตที่มีคุณสมบัติเหมือนกันจำนวน 2 ตัว และมีขาที่สมมาตรกัน

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอสเฟตทั้งสองที่กำหนดจุดทำงานให้เป็นการขยายแบบคลาส-บี ทำได้โดยการจำลองวงจร [14] ซึ่งได้ค่าอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของมอสเฟต ( $Z_{in}$  และ  $Z_{load}$ ) มีค่าเท่ากับ

$(3.47-j3.62)$  และ  $(4.21+j5.54)$  ตามลำดับที่เงื่อนไขกระแสสงบ IDQ (Drain quiescence current) เท่ากับ 400 มิลลิแอมแปร์ และแรงดันไฟกระแสตรง VDS เท่ากับ 50 โวลต์

### 2.2.3 วงจรแมตชิ่งเน็ตเวิร์ค (Matching network circuit)

วงจรแมตชิ่งเน็ตเวิร์คเป็นวงจรที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของมอสเฟตทั้งสองส่วน ( $(3.47-j3.62)$  และ  $(4.21+j5.54)$  โอห์ม) ให้มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของบาลันหรือ  $(25+j0)$  โอห์ม เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดของการถ่ายโอนกำลังจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังโหลดภายนอก โดยที่ตำแหน่งการติดตั้งวงจรแมตชิ่งเน็ตเวิร์คทั้งสองแสดงได้ดังรูปที่ 1

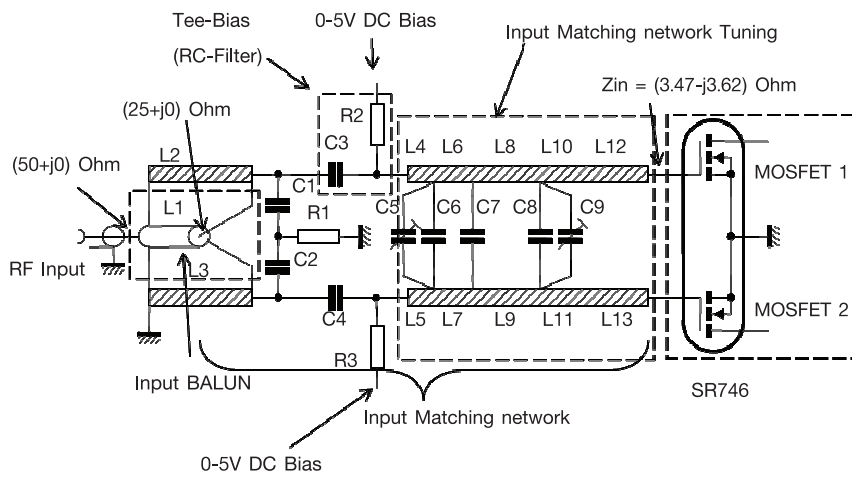
### 3. รายละเอียดการประกอบและการปรับแต่งวงจร

ส่วนประกอบทั้งสามส่วนของโมดูล (2.2.1-2.2.3) จะถูกติดตั้งอยู่ที่ด้านบนของแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้าที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นชนิด FR-4 ซึ่งมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 4.1 ที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ [15] แผ่นวงจรพิมพ์ถูกติดตั้งบนแผ่นอลูมิเนียมซึ่งถูกเซาะร่องในการวางมอสเฟตและในการระบายความร้อนด้วยน้ำ ในการแสดงรายละเอียดต่างๆ ของ

ส่วนประกอบของโมดูลสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ภาคอินพุตและภาคเอาต์พุตของมอสเฟต ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 1

#### 3.1 ภาคอินพุตของมอสเฟต

ภาคอินพุตของมอสเฟตหนึ่งตัวจะประกอบด้วยอินพุตบาลัน วงจรไบอัสแรงดันขาเกตมอสเฟต อินพุตแมตซิ่งเน็ตเวิร์ค และอินพุตอิมพีแดนซ์ของมอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 3



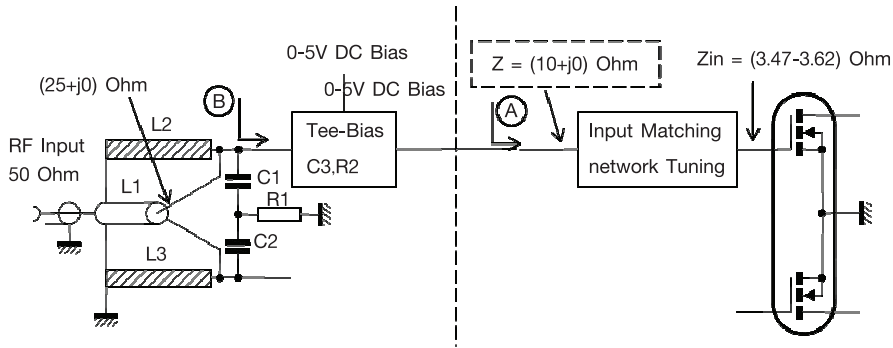
รูปที่ 3 ภาคอินพุตของโมดูล

ในส่วนของอินพุตบาลันหรือ L1 จะทำจากสายส่งแบบแกนร่วมกึ่งแข็ง (Semi-rigid Coaxial cable) ชนิด RG 402 มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ถูกตัดโค้งเพื่อลดขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์ โดยอินพุตบาลันจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับอินพุตแมตซิ่งเน็ตเวิร์คที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำแบบเส้นไมโครสตริบ (Microstrip line) L2-L13 ความต้านทาน R1 ตัวเก็บประจุ C1-C9 โดยที่ C5 และ C9 จะเป็นแบบปรับค่าได้

ส่วนวงจรไบอัสแรงดันขาเกตมอสเฟตตัวที่ 1 และ 2 จะใช้วงจรแบบที-ไบอัส (Tee-bias) ชนิด RC Filter ซึ่งประกอบด้วย C3, R2 และ C4, R3 ตามลำดับ

โดยตัวเก็บประจุทั้งสองตัวจะทำหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟกระแสตรงย้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณ

เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายหลักการในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนภาคอินพุตของมอสเฟต จะกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมตั้งแต่ส่วนของ C5-C9 และ L4-L13 เป็นส่วนเพิ่มเติมเรียกว่า ส่วนอินพุตแมตซิ่งเน็ตเวิร์คแบบปรับค่าได้ (Input matching network tuning) ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์รวมตั้งแต่ Zin จนถึงตำแหน่ง A ให้มีค่าเท่ากับโหลดสมมุติ (Z) ซึ่งถูกกำหนดเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรที่จะมาต่อที่จุด A ต่อไป



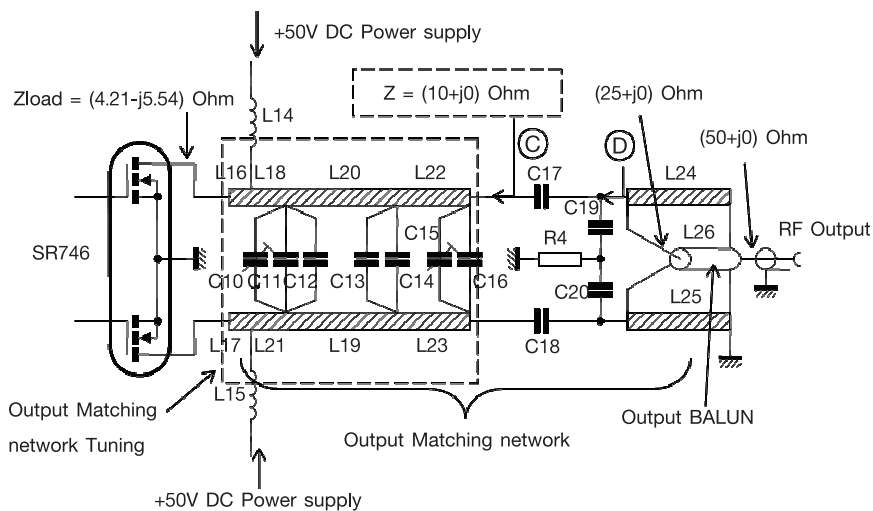
รูปที่ 4 การใช้โหลดสมมุติสร้างวงจรอินพุตแมตซิ่งเน็ตเวิร์ค

ในที่นี้  $Z$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับ  $(10+j0)$  โอห์ม เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ค่ามิติของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ค่าการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ หรือ ความกว้าง ความยาวของไมโครสตริป อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่มากหรือน้อยเกินไป

ส่วนการปรับอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่ง B ซึ่งเป็นผลรวมของอิมพีแดนซ์ของวงจรไบอัสแรงดันขาเกตมอสเฟต และอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่ง A ให้สอดคล้องกับพอร์ตบาลานซ์ของอินพุตบาลานซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(25+j0)$  โอห์ม จะใช้เส้นไมโครสตริป L2 ที่มีความกว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตรต่อลงกราวด์ ส่วน C1, C2 และ R1 ถูกใช้ในการแบ่งแรงดันเอาต์พุตของอินพุตบาลานซ์ให้มีขนาดเท่ากัน

### 3.2 ภาคเอาต์พุตของมอสเฟต

ในภาคเอาต์พุตของมอสเฟตประกอบด้วยเอาต์พุตบาลานซ์ วงจรจ่ายกำลังไฟกระแสตรงเอาต์พุตแมตซิ่งเน็ตเวิร์ค และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 5 วงจรภาคเอาต์พุตนี้จะมีหลักการทำงานเหมือนกับวงจรภาคอินพุตโดยเอาต์พุตแมตซิ่งเน็ตเวิร์คแบบปรับค่าได้ (Output matching network tuning) จะประกอบด้วย L16 - L23 และ C10 - C16 ทำหน้าปรับค่าอิมพีแดนซ์รวมทั้งตำแหน่ง C ให้มีค่าเท่ากับ  $(10+j0)$  โอห์ม



รูปที่ 5 วงจรขยายคลื่นวิทยุแบบพหุ-พหุภาคเอาต์พุต

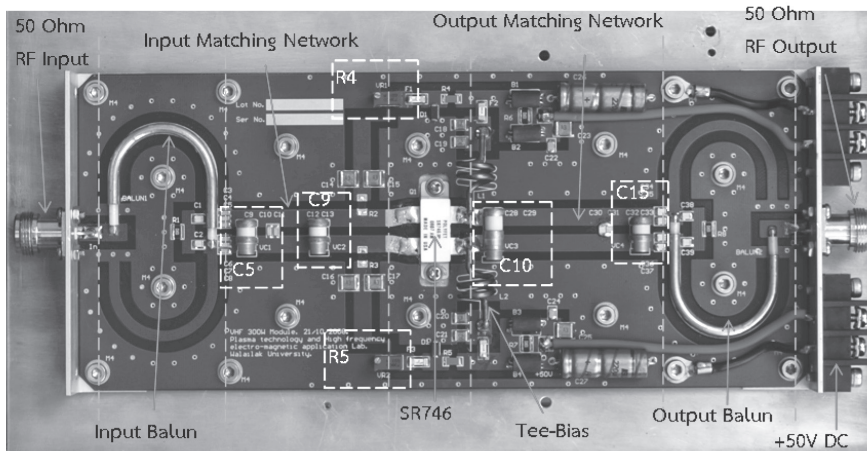
C17 และ C18 ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟตรง 50 โวลต์ ผ่านไปยังเอาต์พุต L14 และ L15 ทำหน้าที่ป้องกันคลื่นวิทยุรบกวนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ส่วน C19 C20 และ R4 ทำหน้าที่ปรับแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุที่ถูกขยายโดยมอสเฟตทั้งสองให้มีขนาดเท่ากัน

L24 และ L25 ทำหน้าที่ปรับค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่ง D ให้เท่ากับ  $(25+j0)$  ก่อนเข้าสู่อินพุตของเอาต์พุตบาลันต่อไป

การจ่ายกำลังไฟกระแสตรงให้กับมอสเฟตใช้วงจรที-ไบอัสเช่นเดียวกับภาคอินพุตแต่จะเป็นชนิด LC Filter

เนื่องจากขาเดรนของมอสเฟตต้องการกระแสสูง [16]

เนื่องจากโมดูลขยายทำงานที่ความถี่สูง การสร้างและประกอบแผ่นวงจรพิมพ์โดยเฉพาะมิติของเส้นหรือช่องต่างๆ สำหรับการวางอุปกรณ์ รวมทั้งการกำหนดค่าของค่าคงที่ไดโพลทริกจะต้องมีความละเอียดถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นเพื่อกันข้อผิดพลาดในสร้างแผ่นวงจรพิมพ์จึงต้องออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนและสั่งผลิตด้วยเครื่องจักร CNC โดยผลการออกแบบ สร้าง และวางอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ บนแผ่นวงจร แสดงได้ในรูปที่ 6



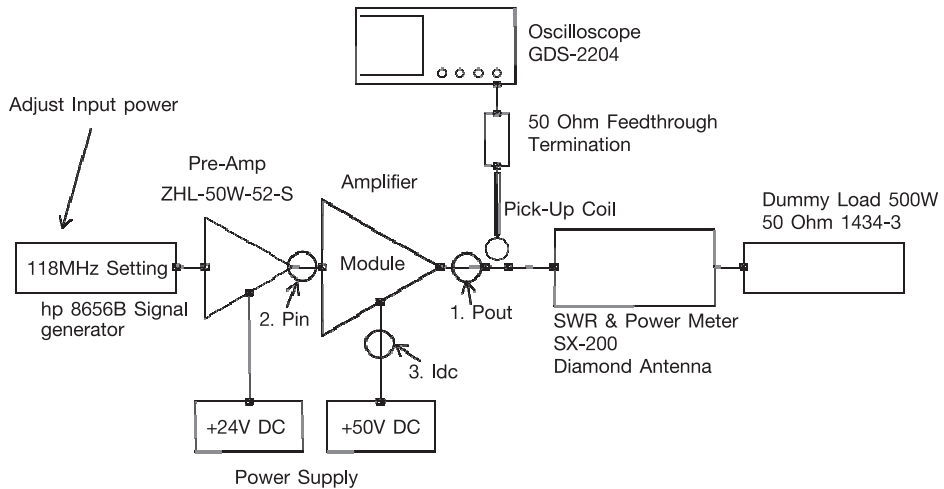
รูปที่ 6 แผ่นวงจรพิมพ์และการวางอุปกรณ์ต่างๆ ของโมดูล

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดลองหาคุณสมบัติเฉพาะของโมดูลขยายแสดงดังรูปที่ 7 ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ รุ่น hp 8656B ที่ตั้งความถี่ไว้ที่ 118 เมกะเฮิรตซ์ และขยายสัญญาณให้สูงขึ้นด้วย Preamplifier รุ่น ZHL-50W-52-S ที่มีอัตราขยายประมาณ 50 dB ก่อนส่ง

เข้าภาคอินพุตของโมดูล สัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะถูกส่งไปยังโหลดเทียม (Dummy load) ที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $(50+j0)$  โอห์ม ผ่านอุปกรณ์วัดกำลังคลื่น รุ่น DIAMOND SX-200 ซึ่งมีความสามารถในการวัดกำลังคลื่นวิทยุได้ไม่เกิน 200 วัตต์





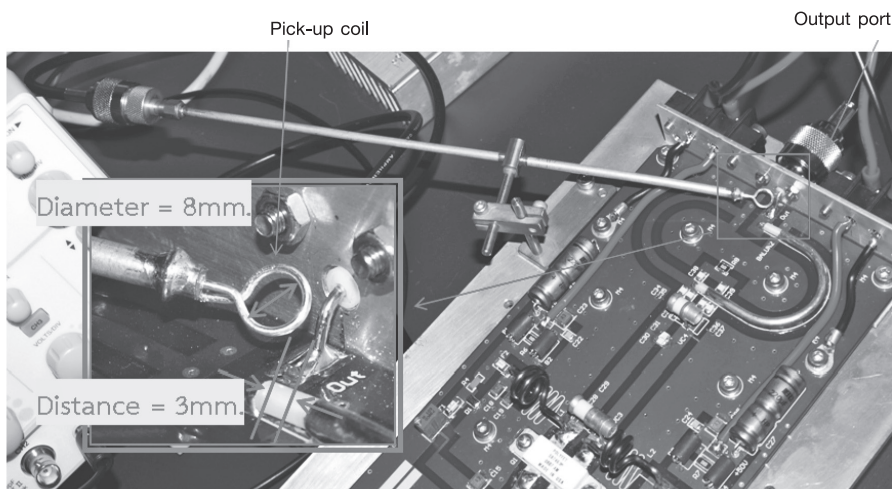
รูปที่ 7 ระบบที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของโมดูลขยาย

สำหรับการวัดคลื่นวิทยุที่กำลังสูงกว่า 200 วัตต์ จะใช้อุปกรณ์เหนี่ยวนำสัญญาณที่เรียกว่าพิก-อัปคอยล์ (Pick-up coil) ในการตรวจจับสัญญาณที่ผ่านการสอบเทียบจากระดับสัญญาณช่วงต่ำกว่า 200 วัตต์ โดยการจัดวางพิก-อัป คอยล์ จะติดตั้งที่ด้านเอาต์พุตของโมดูลขยาย แสดงดังรูปที่ 8 ผลการวัดสัญญาณจากคอยล์และกำลังคลื่นในช่วง 0 - 200 วัตต์ แสดงดังรูปที่ 9 จากกราฟ

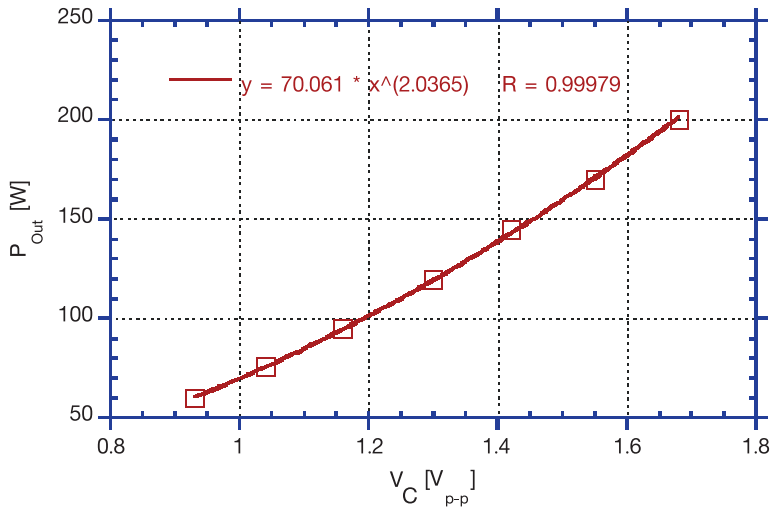
ผลการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ได้ว่า

$$P_{Out} = 70.06V_C^2 \quad (2)$$

ซึ่งสมการที่ (2) จะใช้เป็นตัวแทนในการอ่านค่ากำลังคลื่นที่เกินจาก 200 วัตต์ต่อไป



รูปที่ 8 การติดตั้งพิก-อัปคอยล์ในการวัดสัญญาณคลื่นวิทยุ



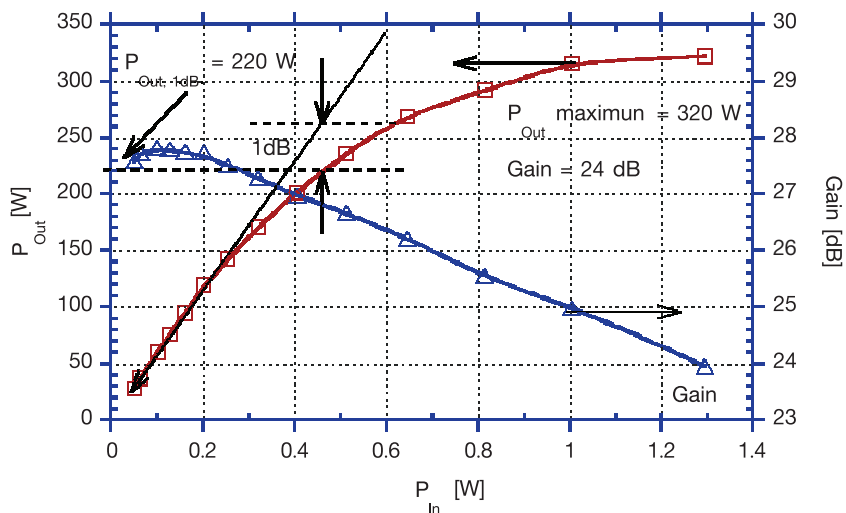
**รูปที่ 9** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตที่วัดด้วย RF Power Meter รุ่น SX-200 เทียบกับ แรงดันที่วัดได้จากพิก-อ็อปคอยล์

การทดลองหาคุณสมบัติของโมดูลทำได้โดยการจ่ายกำลังด้านอินพุต  $P_{in}$  ที่ได้จากแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ แล้วบันทึกค่ากำลังเอาต์พุต ( $P_{Out}$ ). อัตราการขยายของวงจร ( $Gain = 10\log(P_{Out} / P_{in})$ ) และ PAE ของวงจร โดยผลการทดลองพบว่ากำลังเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอินพุตโดยการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือช่วงเป็นเชิงเส้นตั้งแต่ 0-220 วัตต์หรือที่ กำลังอินพุตช่วง 0-0.45 วัตต์ ซึ่งจะเห็นได้จากอัตราขยายที่มีการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่า 1 เดซิเบล หรือ 1 dB

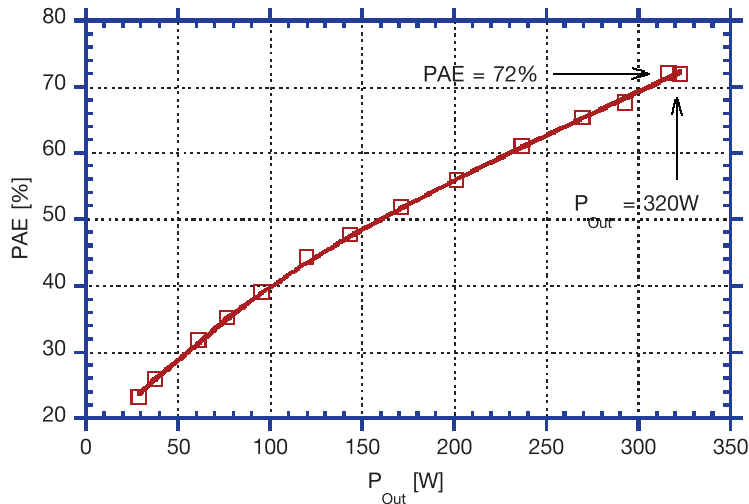
compression point [4] และช่วงอิมิตัวตั้งแต่ 310-320 วัตต์ ซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะการถ่ายโอนกำลังของ มอสเฟต [4, 17]

ผลการทดลองพบว่าอัตราการขยายของวงจรมีค่าลดลง จาก 28 ไปสู่ 24 เดซิเบล เมื่อจ่ายกำลังเอาต์พุตสูงขึ้นจาก 0-320 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 10

ผลการทดลองหาค่า PAE พบว่า PAE จะมีค่าสูงขึ้นตาม  $P_{Out}$  แบบไม่เป็นเชิงและมีค่าสูงสุด 72 เปอร์เซ็นต์ที่ กำลังเอาต์พุต 320 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 11



**รูปที่ 10** กำลังเอาต์พุตและอัตราการขยายของวงจรเทียบกับกำลังอินพุต



รูปที่ 11 PAE ของวงจรเทียบกับกำลังอินพุต

## 5. สรุป

ผลการทดสอบโมดูลที่ความถี่ 118 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าโมดูลมีการขยายแบบเชิงเส้นช่วงอินพุตตั้งแต่ 0-0.45 วัตต์ หรือกำลังเอาต์พุตช่วง 0-220 วัตต์ซึ่งมีอัตราการขยาย 27-28 เดซิเบล โมดูลสามารถจ่ายกำลังเอาต์พุตได้สูงสุด 320 วัตต์ที่ กำลังอินพุตเท่ากับ 1.3 วัตต์แต่มีอัตราการขยายลดลงเป็น 24 เดซิเบล ประสิทธิภาพรวมของโมดูล PAE จะมีค่าสูงขึ้นตามกำลังเอาต์พุตแต่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีค่าสูงสุด 72 เปอร์เซ็นต์เมื่อจ่ายกำลังสูงสุด

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Organization), S.L.R.I.P., 2012, *Major Parameters*, [online], Available: <http://www.slri.or.th/> [15 March].
2. Géraud-Grenier, I., Massereau-Guilbaud, V., and Plain, A., 2004, "Characterization of Particulates and Coatings Created in a 13.56 Mhz Radiofrequency Methane Plasma", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 187, No. 2–3, pp. 336-342.
3. Nisoa, M., Srinoum, D., and Kerdthongmee, P., 2005., "Development of High Voltage High Frequency Resonant Inverter Power Supply for

Surface Glow Barrier Discharges", *Solid State Phenomena*, Vol. 107, No. 81-86.

4. Ludwig, R. and Bretchko, P., 2000, *Rf Circuit Design*, Prentice-Hall, Inc., Pages.

5. Kaewdang, K., Surakamponorn, W., and Fujii, N., 2005. "A Design of Controllable Gain Class B Push-Pull Current Amplifier". *Circuits and Systems, 2005. ISCAS 2005. IEEE International Symposium on*, 23-26 May 2005, pp., 1577-1580 Vol. 1572.

6. Storr, W., *Power Amplifier Classes*, [online], Available: [http://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp\\_\\_1.html](http://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp__1.html) [3 April].

7. Industry, I.F., *Solid State Amplifier Module Model Ssm1-400m-300w*, [online], Available: <http://www.ifi.com> [2 April].

8. Power Module Technology, I., *Power Your World with Pmt*, [online], Available: <http://www.pmttrf.com> [2 April].

9. Piel, C., Aminov, B., Borisov, A., Kolesov, S., and Piel, H., 2005. "Development of a Solid State Rf Amplifier in the Kw Regime for Application

with Low Beta Superconducting Rf Cavities". *Particle Accelerator Conference, 2005. PAC 2005. Proceedings of the*, 16-20 May 2005, pp., 1-3.

10. Jain, A., Hannurkar, P.R., Sharma, D.K., Gupta, A.K., Tiwari, A.K., Lad, M., Kumar, R., Badapanda, M.K., and Gupta, P.D., 2012, "Modular 20kw Solid State Rf Amplifier for Indus-2 Synchrotron Radiation Source", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 676, No. 0, pp. 74-83.

11. Marchand, P., Diop, M., Lopes, R., Polian, J., Ribeiro, F., and Ruan, T., 2005. "High Power (35 Kw and 190 Kw) 352 Mhz Solid State Amplifiers for the Soleil Synchrotron". *Particle Accelerator Conference, 2005. PAC 2005. Proceedings of the*, 16-20 May 2005, pp., 811-813.

12. Gaspar, M., Pedrozzi, M., Ferreira, L.F.R., and Garvey, T., 2011, "A Compact 500mhz 4kw Solid-State Power Amplifier for Accelerator Applications", *Nuclear Instruments and Methods in*

*Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 637, No. 1, pp. 18-24.

13. POLYFET, *Application Notes Numerical Order*, [online], Available: <http://www.polyfet.com> [5 June].

14. POLYFET, *S-Parameter and Spice Model Files*, [online], Available: <http://www.polyfet.com> [5 June].

15. wara microcircuit Co., L., *Material Data-sheet*, [online], Available: <http://www.warapcb.com> [3 April].

16. Baylis, C., Dunleavy, L., and Clausen, W., 2006, "Design of Bias Tees for a Pulsed-Bias, Pulsed - Rf Test System Using Accurate Component Models", *Microwave Journal*, Vol., No.

17. Gupta, A.K., Chen, R.T., Sovero, E.A., and Higgins, J.A., 1985. "Power Saturation Characteristics of Gaas/Algaas High Electron Mobility Transistors". *Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits*, Jun 1985, pp., 50-53.