บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มีความคิดริเริ่มใหม่ (originality) สองประการคือ ประการที่หนึ่ง การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์แบบใหม่ราคาถูก ด้วยการพัลส์แรงดันสูงให้ไดโอดเปล่งแสง ประการที่สอง การวิเคราะห์รูปแบบวงจรสมมูลไดนามิกโดยเทคนิค 2 – พอร์ต (2- port analysis) หาทรานสเฟอร์อิมพีแดนซ์ ได้พัฒนาเทคนิคการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ 3 ลักษณะ คือ (ก) การพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงที่พัลส์ด้วยแรงดันสูง (ข) การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมที่มีราคาถูกด้วยดโอดเปล่งแสง และหลอดทังสเตนฮาโลเจน และ(ค) การวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการทดสอบมอดูเลตความเข้มแสงด้วยคลื่นกระแสสลับรูปแบบต่างๆ

การพัลส์ไดโอดเปล่งแสงใช้แนวคิดว่ากำลังงาน (และความเข้มแสง) ของไดโอดแปรผันกับแรงดันยกกำลังสอง สามารถควบคุมด้วยการปรับความกว้างพัลส์และขนาดพัลส์ การทำงานแบบพัลส์แม้กำลังงานสูง แต่พลังงานในช่วงหนึ่งๆ จะต่ำ ทำให้อุณหภูมิไดโอดต่ำเทียบกับการทำงานต่อเนื่องที่มีในรายงานวิจัยจนถึงปัจจุบัน แหล่งแสงอาทิตย์เทียมเป็นแผงไดโอด 5 แผงขนาด 22.8*22.8 ตารางเซนติเมตร แต่ละแผงใช้ไดโอดสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน สีขาว และสีผสมแดง – เขียว – น้ำเงิน แต่ละแผงได้ทดสอบลักษณะกระแส – แรงดัน และลักษณะความเข้มแสง – กระแส ด้วยการป้อนแรงดันพัลส์ขนาด 2 – 3 เท่าของแรงดันพิกัด ความกว้างพัลส์ 10 มิลลิวินาที ได้ความเข้มแสงสูงบนพื้นงานในระดับ 8 – 10 เท่าของความเข้มพิกัด การวัดสเปกตรัมแสงใช้เรดิโอมิเตอร์ ส่วนความเข้มแสงใช้โฟโตไดโอดที่ผ่านการสอบเทียบ การประเมินคุณภาพแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง ตามเกณฑ์ในมาตรฐาน IEC 60904-9 แสดงว่าแผงไดโอดสีแดงและสีน้ำเงินให้ความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร แผงสีผสม (แดง – เขียว – น้ำเงิน) 800 วัตต์ต่อตารางเมตร และแผงสีเขียวและแผงสีขาว 400 วัตต์ต่อตารางเมตร แสงจากแผงไดโอดสีแดง เขียว น้ำเงิน เป็นสเปกตรัมเดี่ยวซึ่งต่างจากสเปกตรัมมาตรฐาน ทั้งความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของความเข้มแสงอยู่ในมาตรฐาน Class B การพัลส์แรงดันสูงสร้างความเข้มแสงบนพื้นทดสอบได้สูงกว่างานก่อนหน้านี้

ในการวิจัย ได้สร้างแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดทังสเตนฮาโลเจน และแบบแสงผสมทังสเตนฮาโลเจน – ไดโอดสีน้ำเงิน ชนิดแรกใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน กำลังพิกัด 50 วัตต์ 12 โวลต์

จำนวน 3*3 หลอด วางในดวงโคมที่สร้างขึ้น และระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ หลอดไฟถูกควบคุมแรงดันหลอดให้มีขนาด 100%, 120% และ 140% ของแรงดันพิกัด และควบคุมความเข้มแสงบนพื้นงานในระดับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ระยะ 42, 62 และ 78 เซนติเมตร ตามลำดับ แหล่งกำเนิดแสงหลอดทังสเตนฮาโลเจน มีสเปกตรัมของแสงสีแดงสูงกว่าสเปกตรัมมาตรฐาน และเมื่อเพิ่มระดับแรงดันหลอด สเปกตรัมเลื่อนค่าสูงสุดมาทางสีน้ำเงินมากขึ้น แต่จัดอยู่ในระดับชั้นคุณภาพ Class C ทั้ง 3 ค่าแรงดัน ความไม่สม่ำเสมอบนพื้นงานและความไม่เสถียรความเข้มแสงจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ Class B และ Class A ตามลำดับ การปรับปรุงคุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงทังสเตนฮาโลเจนโดยการเพิ่มแผงไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินติดตั้งตรงกลางระหว่างหลอดทังสเตนฮาโลเจน 2 ดวงโคม การเพิ่มแสงสีน้ำเงินทำให้แหล่งกำเนิดแสงมีคุณภาพดีขึ้นจากเดิมที่อยู่ในชั้นคุณภาพ Class CBA เป็น Class BBA

ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมมาตรฐาน Class AAA หาพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยวขนาด 12.5*12.5 ตารางเซนติเมตร ที่ผนึกบนกระจก อีวีเอ และแผ่นหลังที่ภาวะทดสอบมาตรฐาน เซลล์ตัวอย่างมีกำลังพิกัด 1.72 วัตต์ ค่ากระแสลัดวงจร 4.63 แอมแปร์ แรงดันเปิดวงจร 0.58 โวลต์ ฟิลแฟคเตอร์ 0.637 และประสิทธิภาพร้อยละ 11.7 ในภาวะมืดเซลล์ตัวอย่างมีค่าความต้านทานอนุกรม 0.03 โอห์ม และความต้านทานขนาน 5.20 โอห์ม

แหล่งกำเนิดแสงที่พัฒนาขึ้นเป็นแหล่งกำเหนิดแสงที่ต่างจากสภาวะมาตรฐาน ได้ใช้วัดลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์ตัวอย่างเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมมาตรฐาน Class AAA พบว่า เมื่อยังไม่ได้ปรับแก้ค่า ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แตกต่างจากผลทดสอบในภาวะมาตรฐาน แต่เมื่อปรับแก้ค่าด้วยวิธีมาตรฐาน IEC 60891 แล้ว ทำให้ลักษณะกระแส – แรงดันมีลักษณะไม่แตกต่างกัน และพบว่า ลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดันมีลักษณะไม่ต่างกันด้วย ดังนั้นแหล่งกำเหนิดแสงราคาถูกและควบคุมได้ง่ายนี้ ที่พัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถใช้หาลักษณะกระแส – แรงดันและพารามิเตอร์ของเซลล์ได้

ในการหาทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ พิจารณาว่าเซลล์เป็นวงจร 2 พอร์ต พอร์ตอินพุทเป็นพอร์ตที่แหล่งกระแสแสง (photocurrent) ที่เกิดจากแสงตกกระทบ ส่วนพอร์ตเอาท์พุทเป็นพอร์ตที่โหลดความต้านทาน ทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันตกคร่อมโหลด ต่อกระแสแสง ทั้งนี้แสงที่ตกกระทบเซลล์ที่ถูกควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วยแสงไบอัส(ค่าคงที่) และแสงที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญานมีคาบ (periodic) แบบคลื่นไซนูซอยดาล คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม คลื่นฟันเลื่อย ในช่วงความถี่ 10 Hz – 10 kHz แสงไบอัสมาจากหลอดทังสเตนฮาโลเจนที่ความเข้ม 1,007 วัตต์ต่อตารางเมตร และจากไดโอดไม่เกิน 33 วัตต์ต่อตารางเมตร ส่วนแสงที่ถูกมอดูเลตมีค่าไม่เกินร้อยละ 2 ของแสงไบอัส

ได้ปรับความถี่ของสัญญานมอดูเลตและแรงดันไบอัสเซลล์ วัดทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟาสท์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม คำนวณอัมปลิจูดทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ และคาปาซิแตนส์ของเซลล์ ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะคลื่นและสเปคตรัมที่ต่างไป ให้ความสัมพันธ์เหมือนกันระหว่างทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ คาปาซิแตนส์ กับความถี่ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนส์ – ความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์กับเทคนิคอิมพีแดนส์-สเปกโตรสโกปีในภาวะสว่าง พบว่าเหมือนกัน

การวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์และคาปาซิแตนส์ ณ จุดทำงานอื่น พบสัญญาณกระแสโหลดถูกอิทธิพลของอิมพีแดนส์สายต่อวงจรระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องมือวัด ตัวแบบสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ และคาปาซิแตนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทั่วไปมิได้พิจารณาอิมพีแดนส์สายต่อวงจร จึงได้ปรับปรุงและวิเคราะห์ตัวแบบสมการใหม่ และนำไปใช้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ในอุณหภูมิที่ต่างกัน 3 ระดับ คือ 300, 315, และ 330 องศาเคลวิน พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์ต่างกัน ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ของเซลล์แตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิของเซลล์สูงขึ้น คาปาซิแตนส์ของเซลล์มีค่าสูงขึ้นด้วย

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนส์ – แรงดัน ของเซลล์แสดงว่าช่วงความถี่หนึ่ง เซลล์มีค่าคาปาซิแตนส์คงที่ในช่วงแรงดันไบอัสเซลล์ต่ำ (ประมาณ 0.15 - 3.0 โวลต์) แต่คาปาซิแตนส์เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรงดันไบอัสเซลล์สูง (0.3 - 0.5 โวลต์) อธิบายได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะสว่างมีค่ากระแสสูงในช่วงแรงดันต่ำ อิทธิพลของดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์มีมาก เมื่อเซลล์ทำงานในช่วงแรงดันสูง ซึ่งเซลล์มีค่ากระแสลดน้อยลง จึงแสดงอิทธิพลของทรานสิชันคาปาซิแตนส์ นอกจากนี้ “ม๊อต – ชอตกี้ พล๊อต” แสดงความสัมพันธ์ส่วนกลับของคาปาซิแตนส์ยกกำลังสองต่อค่าแรงดัน ($1/C^2$ vs V) แสดงให้เห็นว่า สโลปของกราฟแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ในช่วงแรงดันต่ำ สโลปมีค่าต่ำและคงที่ แสดงให้เห็นอิทธิพลของดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์ และที่ช่วงแรงดันสูง สโลป มีค่าลบมาก เกิดจากผลของทรานสิชันคาปาซิแตนส์ในรอยต่อแบบเปลี่ยนกระหันหัน (Abrupt junction)

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง มีแนวทางในการพัฒนาการศึกษาและวิจัยต่อไป ดังนี้

(ก) แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงในการศึกษานี้ มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีสเปกตรัมเดี่ยว ซึ่งอยู่นอกเกณฑ์มาตรฐานIEC 60904-9 มีโอกาสในการพัฒนา

ให้มีสเปกตรัมแสงดีขึ้น โดยการผสมแสงจากไดโอดเปล่งแสงที่มีสเปกตรัมต่างกันในช่วง 400 ถึง 1,100 นาโนเมตร และสามารถใช้เทคนิคพัลส์แรงดันสูงเพื่อสร้างความเข้มแสงให้ได้มากขึ้นในระดับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่เสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้

นอกจากนี้ แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบัน (ในการศึกษานี้ และอื่น ๆ) มีขนาดเพื่อทดสอบเซลล์เดี่ยว จึงมีโอกาสพัฒนาไปสู่การทดสอบสำหรับแผงเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ได้อีกมาก

(ข) การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมแสงผสมทังสเตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง ในการศึกษานี้ มีระดับชั้นคุณภาพ Class BBA จึงสามารถพัฒนาขึ้นไปได้อีก โดยการปรับปรุงสเปกตรัมและความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นงาน ในการปรับปรุงสเปกตรัมแสงนั้น อาจใช้ไดโอดเปล่งแสงในช่วง 400 ถึง 500 นาโนเมตร ที่มีสเปกตรัมต่างกันอีก 3 ช่วงความยาวคลื่น เพื่อให้สเปกตรัมสอดคล้องกับมาตรฐานชั้นคุณภาพ Class A ส่วนการปรับปรุงคุณภาพของความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นงานทดสอบนั้น อาจทำได้โดยการเพิ่มจำนวนหลอดให้ครอบคลุมพื้นที่การทดสอบให้มากขึ้น วางหลอดให้ความเข้มแสงซ้อนทับกันพอดี และเพิ่มระยะห่างระห่างหลอดกับพื้นงานทดสอบให้มากขึ้น

(ค) การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีมอดูเลตความเข้มแสง ได้ใช้ตัวแบบสมการของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าแรงดันที่ขั้ว เทียบกับค่ากระแสแสง ในการพัฒนาปรับปรุง อาจวิเคราะห์ด้วยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระแส (Current transfer function) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ที่ต่างกัน การศึกษาแบบใหม่นี้ อาจใช้ประเมินเซลล์แสงอาทิตย์ต่างชนิดกันได้ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว มีค่ากระแสสูงแต่แรงดันต่ำ อาจเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ด้วยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระแส มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ หรือในทางกลับกัน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนอะมอฟัส ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีค่ากระแสต่ำ แต่แรงดันสูง ก็อาจให้ผลกลับกันก็เป็นได้ เป็นต้น