

บทที่ 4 ผลและอภิปราย

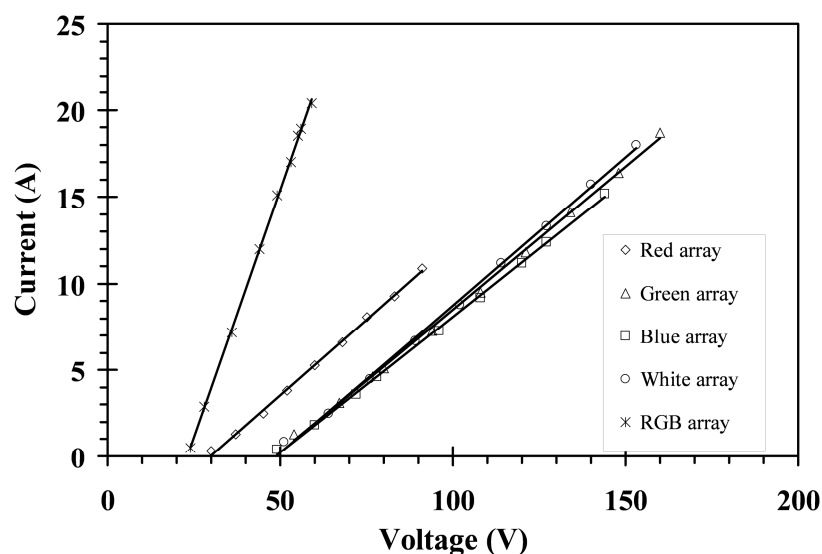
งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ซึ่งศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง ประกอบด้วย (ก) สมบัติของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสามชนิด คือ ไดโอดเปล่งแสง ทั้งสแตนด์ฮาลोजен และแสงผสมทั้งสแตนด์ฮาลोजен – ไดโอดเปล่งแสง (ข) พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง (ค) ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ และคาปาซิแตนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 สมบัติของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงพัลส์แรงดันสูง

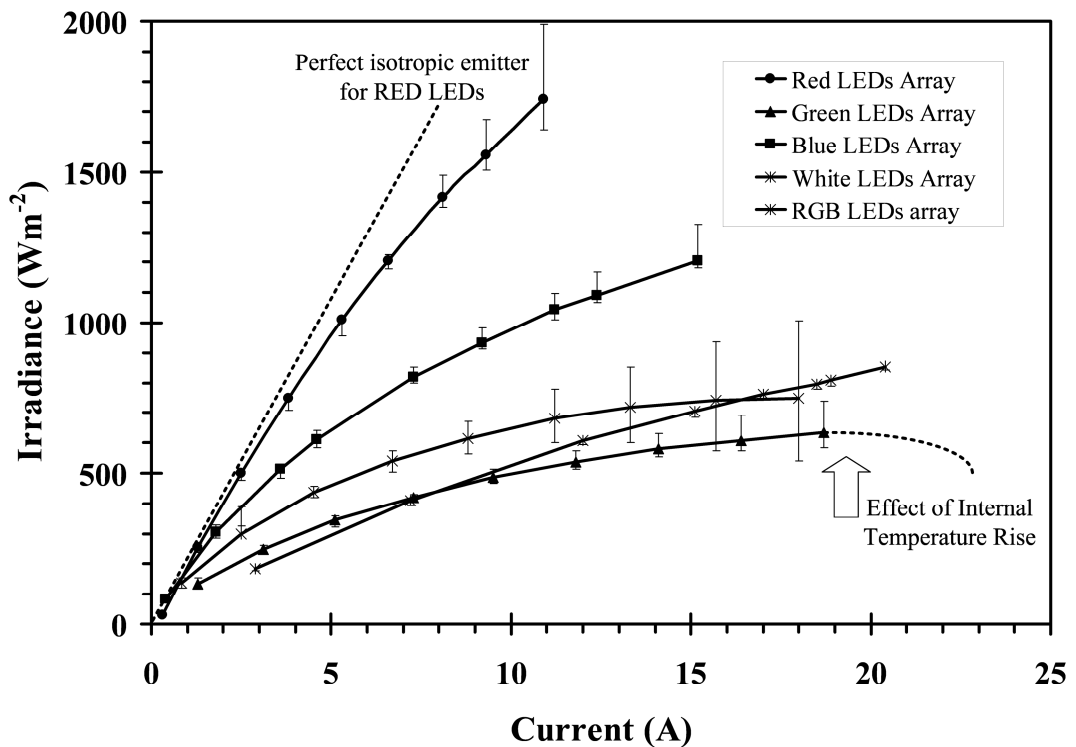
การศึกษาสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมประกอบด้วย ลักษณะความเข้มแสง-กระแส สมบัติทางอุณหภูมิจาก สเปกตรัม ความไม่สม่ำเสมอ และความไม่เสถียรความเข้มแสง

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสง

เพื่อศึกษาการควบคุมขนาดแรงดันพัลส์ที่จ่ายให้ไดโอดเปล่งแสง โดยไดโอดยังไม่ถูกทำลาย ได้ทดลองป้อนแรงดันพัลส์เป็น 2-3 เท่าของแรงดันพิกัด พัลส์เดียวที่มีความกว้าง 10 มิลลิวินาที มีกระแสไหล 8-10 เท่าของกระแสพิกัด ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน-กระแสแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะกระแส – แรงดันของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง – กระแสแรงดันของไดโอดเปล่งแสง

ผลการศึกษาพบว่า

ก) ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะกระแส – แรงดันของแผงไดโอดเปล่งแสงทั้ง 5 แผง เป็นเส้นตรง แสดงว่าความต้านทานของแผงไดโอดไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรงดันที่ป้อน

ข) แผงไดโอดเปล่งแสงสีผสม (แดง – เขียว – น้ำเงิน) มีความต้านทานอนุกรมประมาณ 2 โอห์มและต่ำกว่าแผงไดโอดสีอื่น รองลงมา คือ แผงสีแดง 5 โอห์ม และ ส่วนแผงสีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาว 10 โอห์ม ดังนั้นที่แรงดันที่ป้อนให้แผงไดโอดเท่ากัน แผงไดโอดสีแดง จะได้กระแสสูงสุด และให้ความเข้มสูงสุด

ค) ผลการวัดลักษณะความเข้มแสง – กระแสของแผงไดโอด ในช่วงพัลส์เดียว 8 – 10 เท่า ของกระแสพิกัด ในเวลา 10 มิลลิวินาที พบว่า แผงสีแดงให้ความเข้มสูงถึง 1,500 วัตต์ต่อตารางเมตร ในขณะที่แผงสีเขียว น้ำเงิน ขาว ให้ความเข้มต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อมีกระแสไหลผ่านทุกแผงสูงขึ้น ทำให้ความเข้มแสงตกลง เป็นเพราะรอยต่อพีเอ็นมีอุณหภูมิสูงขึ้น พลังค์แสงจึงมีค่าลดลง [62]

การศึกษาส่วนนี้ เป็นงานวิจัยชิ้นแรกที่มีการรายงานในการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงจากไดโอด สามารถกล่าวได้ว่า เป็นความใหม่ของการวิจัย ที่ใช้พัลส์แรงดันค่าสูงกว่าแรงดันพิกัด ทำให้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงมีความเข้มแสงสูงขึ้น โดยไดโอดไม่ถูกทำลาย

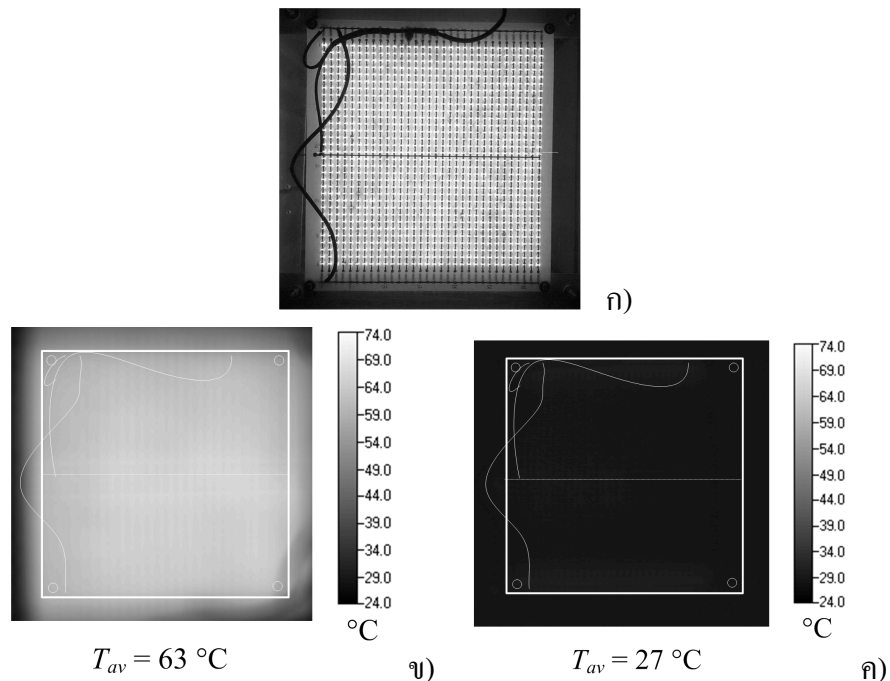
4.1.2 สมบัติทางอุณหภูมิจากแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสง

ได้เปรียบเทียบอุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนของแผงไดโอดเปล่งแสง ระหว่างการทำงานแบบต่อเนื่องและแบบพัลส์ โดยแผ่นระบายความร้อนของแผงไดโอดทั้ง 5 แผง (ขาว แดง น้ำเงิน เขียว และผสมแดง-น้ำเงิน-เขียว) ทำงานภายใต้ 2 กรณีคือ

ก) ป้อนกระแสไฟอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 300 วินาที

ข) ป้อนพัลส์แรงดัน 3 – 5 เท่าของแรงดันพิกัด ที่ความกว้างพัลส์ 10 มิลิวินาที คาบ 1 วินาที รวม 300 วินาที วัดอุณหภูมิที่แผ่นระบายความร้อนทั้ง 5 แผง แสดงตัวอย่างรูปอุณหภูมิแผ่นระบายความร้อนแผงไดโอดสีแดงตามรูป 4.3

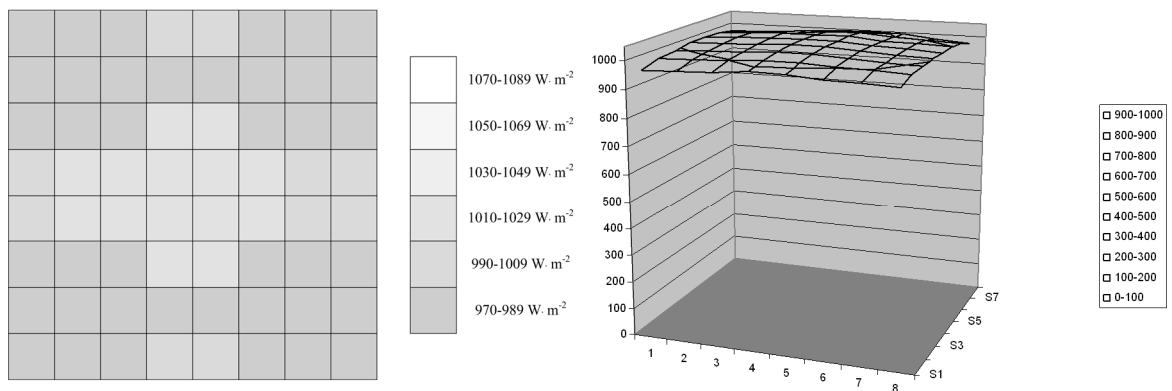
การทำงานแบบต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนของแผงไดโอดเปล่งแสงสีแดงมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 63 องศาเซลเซียส ในการทำงานแบบพัลส์ แผงไดโอดเปล่งแสงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง คือ มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ดังนั้น การพัลส์แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงด้วยแรงดันสูง นอกจากทำให้ได้ความเข้มแสงสูงแล้ว ยังทำให้แผงไดโอดมีอุณหภูมิต่ำกว่าการจ่ายแรงดันแบบต่อเนื่องด้วย และควรทำให้อายุการใช้งานยาวนาน



รูปที่ 4.3 แผ่นระบายความร้อน ก) ด้านหลังแผงไดโอดสีแดง ข) ที่ทำงานต่อเนื่อง และ ค) แบบพัลส์

4.1.3 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ไดโอดเปล่งแสง

ผลการวัดความไม่สม่ำเสมอกับความเข้มแสงของแผงไดโอดสีแดง แผงสีเขียว แผงสีน้ำเงิน แผงสีขาว และแผงสีผสม (แดง – เขียว – น้ำเงิน) ทำให้สามารถแสดงตัวอย่างความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดง ด้วยโฟโตไดโอด บนพื้นงานขนาด 15*15 ตร. ซม. ที่แบ่งเป็น 64 ส่วน (8*8 ส่วน) แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นงานของแหล่งกำเนิดแสงชนิดไดโอดสีแดง

ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงของแผงไดโอดแต่ละสี มีค่าดังนี้ แผงสีแดงร้อยละ 2.6 แผงสีเขียวร้อยละ 3.9 แผงสีน้ำเงินร้อยละ 2.9 แผงสีขาวร้อยละ 3.7 และแผงสีผสม (แดง – เขียว – น้ำเงิน) ร้อยละ 4.0 โดยรวมแล้ว มีค่าระหว่างร้อยละ 2.0 ถึง 5.0 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ บี (Class B) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของความเข้มแสงของแผงไดโอดเปล่งแสง

แผงไดโอดเปล่งแสง	ความเข้มแสง (W/m ²)	Uniformity (Class)	Instability (Class)
สีแดง	820, 1,010	B	A, A
สีน้ำเงิน	812, 1,008	B	B, A
สีผสม	810	B	B
สีเขียว	408	B	B
สีขาว	420	B	B

4.1.4 เสถียรภาพของความเข้มแสงพัลส์ของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสง

ความไม่เสถียรของค่ากระแสและความเข้มแสง ตลอดช่วงเวลาพัลส์ 10 มิลลิวินาที ของแสงไดโอดเปล่งแสง 5 แฉง คือแฉงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน สีขาว และสีผสม ถูกวัดเมื่อป้อนด้วยแรงดันพัลส์ระหว่างหนึ่งเท่า สอง และสามเท่าของแรงดันพิกัด

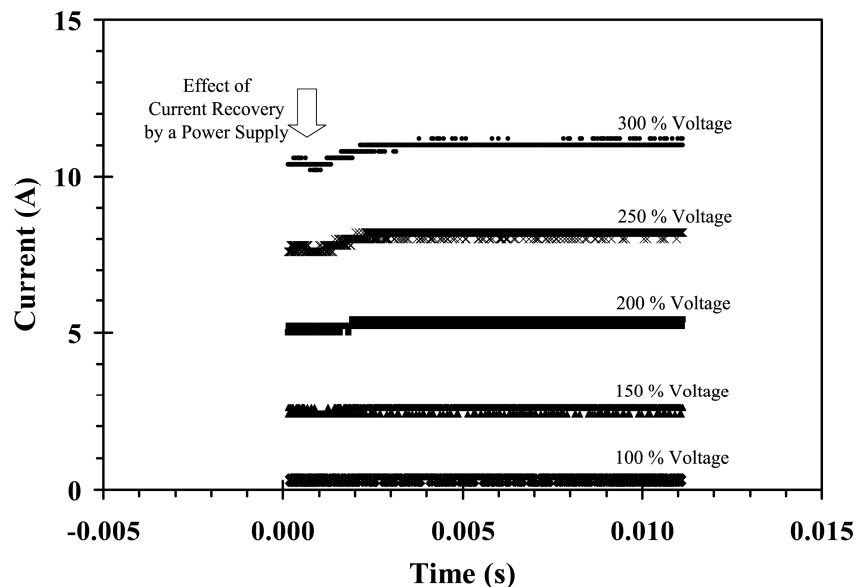
ผลการศึกษาพบว่า

ก) การพัลส์แรงดันที่ไม่เกินสองเท่าของพิกัด ทำให้ค่ากระแสและค่าความเข้มแสงของไดโอดเปล่งแสงมีเสถียรภาพมาก ดังรูปที่ 4.5

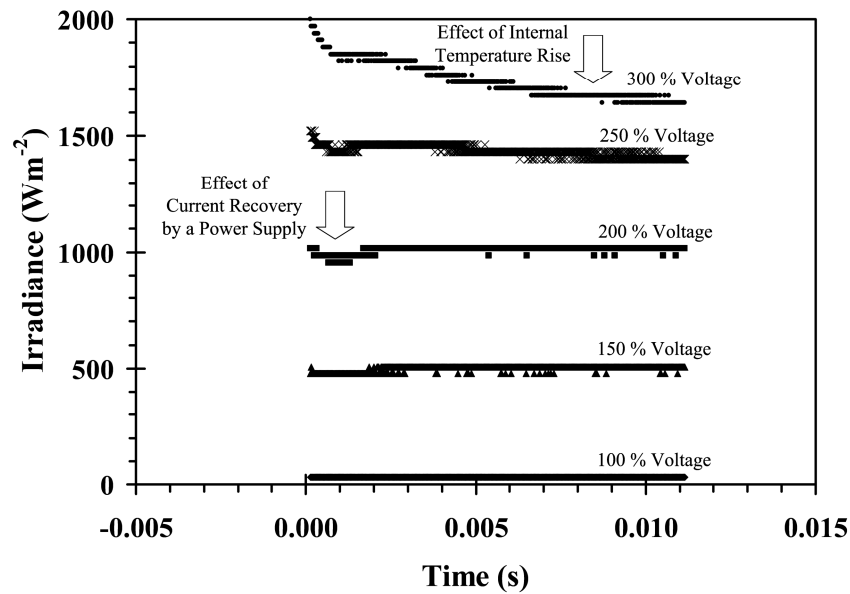
ข) แต่เมื่อพัลส์สูงถึงสามเท่าของแรงพิกัด ค่ากระแสในช่วง 2 มิลลิวินาทีแรกไม่เสถียรเนื่องจากผลการคืนตัวของกระแส (Current recovery) จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ค) นอกจากนี้ การพัลส์แรงดันสูง ทำให้ความเข้มแสงมีค่าลดลงตลอดช่วงเวลาพัลส์ ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากอุณหภูมิภายในไดโอดเปล่งแสงที่เพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม แหล่งแสงอาทิตย์เทียมจากไดโอดเปล่งแสงทุกแฉง มีความไม่เสถียรของความเข้มแสงต่ำกว่าร้อยละ 5 อยู่ใน Class B ตามมาตรฐานไออีซี 60904-9 [66] ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 ความไม่เสถียรของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ป้อนเข้าแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเปล่งแสงสีแดง



รูปที่ 4.6 ความไม่เสถียรของความเข้มแสงบนพื้นงานของแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเปล่งแสงสีแดง

4.1.5 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสงพัลส์แรงดันสูง

วัดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสงทุกชนิดด้วยสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ และแสดงผลเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐาน ไออีซี 60904-3 [97] ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงว่า

ก) สเปกตรัมของแสงจากแผงไดโอดเปล่งแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เป็นสเปกตรัมเดี่ยวที่มีความแตกต่างจากสเปกตรัมมาตรฐาน (ซึ่งเป็นสเปกตรัมต่อเนื่อง) มีความเข้มแสงสูงมาก สูงกว่าความเข้มในสเปกตรัมมาตรฐานนับสิบเท่า ส่วนแผงไดโอดสีขาว มีสเปกตรัมต่อเนื่องในช่วงตามมองเห็น 400 – 780 nm

ข) สเปกตรัมของแสงจากแผงไดโอดสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน มีองค์ประกอบหลายสี (หลายความยาวคลื่น) ไม่ใช่สีเดียวหรือความยาวคลื่นเดียว (non-monochromatic) ค่า band-width ของแต่ละสเปกตรัมประมาณ 50 nm จึงมีสเปกตรัมองค์ประกอบน้อยกว่าสเปกตรัมมาตรฐานมาก

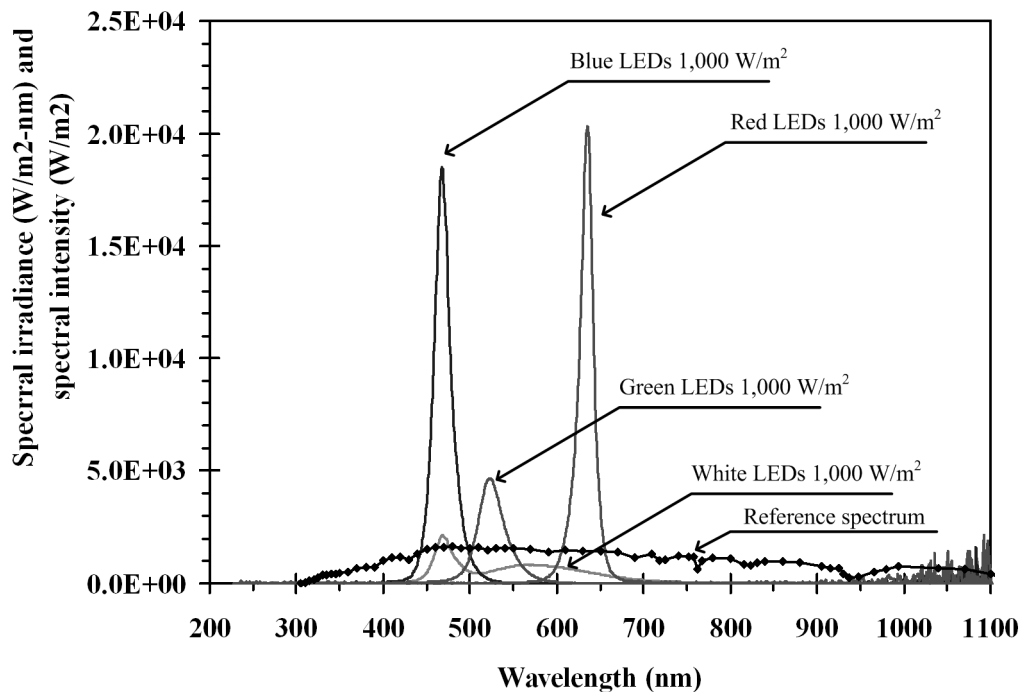
สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงทุกแผงมีความแตกต่างจากกับสเปกตรัมมาตรฐานอย่างมาก จึงไม่สามารถจำแนกชั้นคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน ไออีซี 60904-9 ประเด็นอยู่ที่ว่า แม้สเปกตรัมจะไม่เข้าเกณฑ์ แต่ถ้าสามารถใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบไดโอดในการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ จะมีความคล่องตัวกว่า และถูกกว่า จึงต้องศึกษาเชิงลึกต่อไป

โดยสรุปแล้ว

ก) การพัลส์แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสง ช่วยเพิ่มความเข้มแสงและรักษาอุณหภูมิของแผงให้ต่ำ

ข) แผงไดโอดแสงสีแดงและสีน้ำเงิน ที่สร้างขึ้นมีความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร สูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสงที่ประดิษฐ์ก่อนหน้านี้ [67-77] ส่วนแผงสีผสม มีความเข้ม 800 วัตต์ต่อตารางเมตร แผงสีเขียวและสีขาวมีความเข้ม 400 วัตต์ต่อตารางเมตร

ค) แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสง มีความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของความเข้มแสงอยู่ในชั้น Class B



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง

4.2 สมบัติของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทังสเตนฮาโลเจน-ไดโอดเปล่งแสง

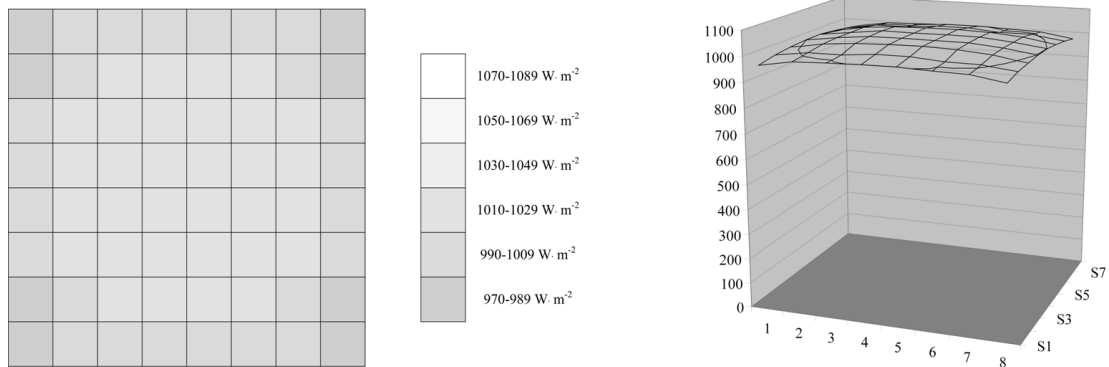
ได้ศึกษาในแนวทางเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงชนิดไดโอด คือ ความไม่สม่ำเสมอ ความไม่เสถียร และสเปกตรัม ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมมีสองแบบ คือหลอดทังสเตนฮาโลเจน และชนิดผสมทังสเตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง

4.2.1 ความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของความเข้มแสงบนพื้นงานของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมทั้งสแตนฮาโลเจน และแสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน-ไดโอดเปล่งแสง

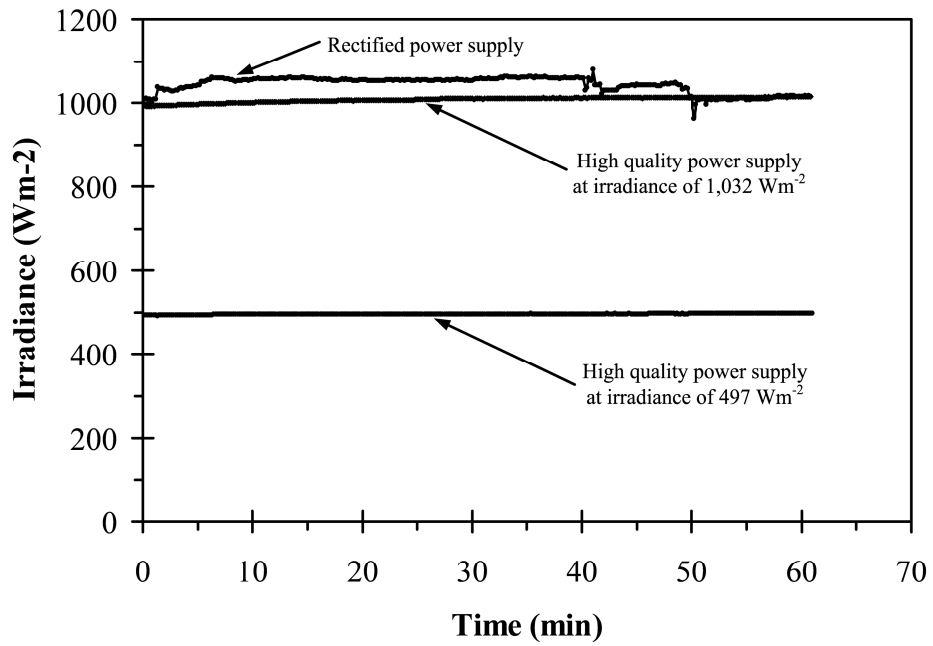
ใช้ไพรมามิเตอร์วัดความเข้มแสง บนพื้นที่ทดสอบขนาดไม่น้อยกว่า 17.5*17.5 ตารางเซนติเมตร แบ่งพื้นที่เป็น 64 ส่วน (8*8 ส่วน) เมื่อประเมินค่าความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสง พบว่า แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมทั้งสแตนฮาโลเจน และชนิดผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง มีความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงอยู่ในชั้นคุณภาพ Class B แสดงดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.2

แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจน

วัดความไม่เสถียรของความเข้มแสง ใช้แหล่งจ่ายกระแสสองแบบ คือ แหล่งจ่ายที่แปลงไฟกระแสตรงจากระบบไฟฟ้าที่มีราคาถูกลง กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าคุณภาพสูงที่มีราคาแพง พบว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าคุณภาพสูง แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมมีความไม่เสถียรของความเข้มแสงอยู่ในชั้นคุณภาพ Class A แสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.8 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมทั้งสแตนฮาโลเจน



รูปที่ 4.9 ความไม่เสถียรของความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจน

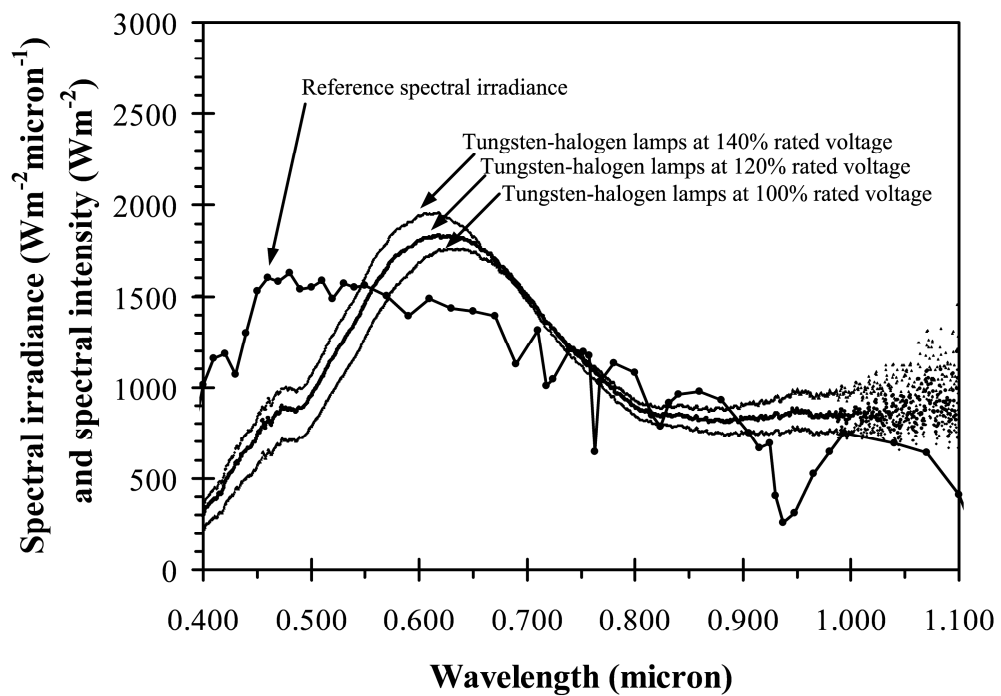
ตารางที่ 4.2 ความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนฮาโลเจน

แหล่งกำเนิดแสง แรงดันและระยะห่าง	ความเข้มแสง เฉลี่ย (W/m ²)	ความสม่ำเสมอ Uniformity		ความไม่เสถียร Stability	
		% ความไม่ สม่ำเสมอ	ชั้น คุณภาพ	% ความไม่เสถียร เชิงเวลา	ชั้นคุณภาพ
หลอดทั้งสแตนฮาโลเจน					
100% rated voltage, 42 cm	1004	9.8	C	1.25	A
120% rated voltage, 62 cm	1006	4.85	B	1.25	A
140% rated voltage, 78 cm	1005	2.60	B	1.25	A
หลอดทั้งสแตนฮาโลเจน และไดโอดน้ำเงิน					
120% rated voltage, 62 cm	1,040	3.60	B	0.47	A

4.2.2 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจนและชนิดแสงผสม ทั้งสแตนฮาโลเจน-ไดโอดเปล่งแสง

ใช้เรดิโอมิเตอร์วัดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจน แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ผลการศึกษาพบว่า สเปกตรัมของแสงทั้งสแตนฮาโลเจนแตกต่างจากสเปกตรัมมาตรฐาน โดยมีพลังงานคลื่นยาว (แสงสีแดงและอินฟราเรดใกล้) มากกว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเป็น 100% 120% และ 140% ของพิกัด ทำให้หลอดเปล่งแสงด้วยอุณหภูมิสูงขึ้น จุดสูงสุดของสเปกตรัม (spectral peak) เลื่อนไปทางด้านคลื่นสั้น (สีน้ำเงิน) ความเข้มสูงขึ้น ทำให้ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและพื้นที่ทดสอบ เพื่อรักษาความเข้มที่ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร

ประเมินความไม่สอดคล้องสเปกตรัมแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจนเพื่อกำหนดระดับชั้นคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน ไออีซี 60904-9 ซึ่งให้แบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 6 ช่วง แล้วจึงเทียบสัดส่วนพลังงานแต่ละช่วงของสเปกตรัมแสง กับเกณฑ์มาตรฐานดังตารางที่ 4.3 พบว่าหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนที่ถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็น 100% 120% และ 140% ของแรงดัน มีความไม่สอดคล้องสเปกตรัมแสงต่างกันไป จัดอยู่ในระดับชั้นคุณภาพ Class C



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจนที่ระดับแรงดันต่าง ๆ (เมื่อเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้หลอด spectral peak ขยับไปทางคลื่นสั้น และความเข้มสูงขึ้น)

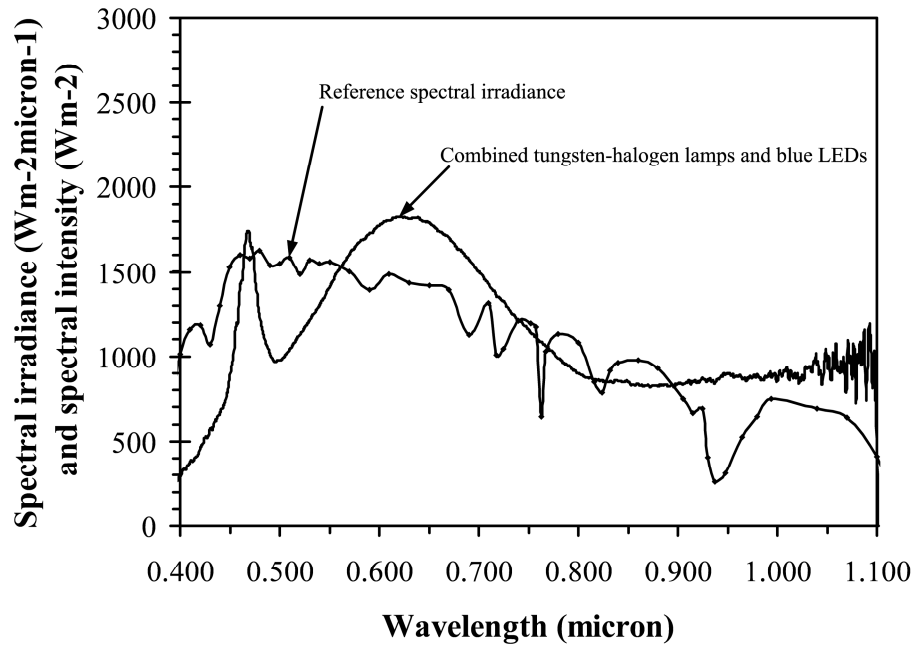
จากการเทียบสเปกตรัมของหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนและสเปกตรัมมาตรฐาน เราเห็นว่าสเปกตรัมของหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนขาดแสงสีน้ำเงิน สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจน จึงถูกยกระดับคุณภาพจาก Class C เป็น Class B โดยเพิ่มแสงสีน้ำเงินของไดโอดเปล่งแสงเข้าไป ดังรูปที่ 4.11 และ ดังตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาพบว่า การผสมแสงสีน้ำเงินของไดโอดเปล่งเข้ากับแสงทั้งสแตนฮาโลเจน สามารถยกคุณภาพแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมจาก Class CBA เป็น Class BBA

การศึกษาส่วนนี้เป็นงานวิจัยชิ้นแรกเช่นกันที่มีการรายงานในการยกคุณภาพแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนด้วยการเพิ่มแสงจากไดโอดสี สามารถกล่าวได้ว่าเป็นความใหม่ของการวิจัย

ตารางที่ 4.3 ความไม่สอดคล้องสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนฮาโลเจน
กับสเปกตรัม AM1.5

ช่วงสเปกตรัม (nm)	แรงดันอินพุท 100% ของแรงดันพิกัด		แรงดันอินพุท 110% ของแรงดันพิกัด		แรงดันอินพุท 120% ของแรงดันพิกัด	
	สัดส่วนพลังงาน ในช่วงสเปกตรัม เดียวกัน	Class	สัดส่วนพลังงาน ในช่วงสเปกตรัม เดียวกัน	Class	สัดส่วนพลังงาน ในช่วงสเปกตรัม เดียวกัน	Class
400-500	0.40	C	0.49	C	0.55	C
500-600	0.84	A	0.95	A	1.04	A
600-700	1.21	A	1.25	A	1.28	B
700-800	1.05	A	1.04	A	1.00	A
800-900	0.94	A	0.88	A	0.82	A
900-1100	1.65	C	1.38	B	1.29	B
Classification	$1,010 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	C	$1,009 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	C	$1,010 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	C

หมายเหตุ สัดส่วนพลังงานในช่วงสเปกตรัมเดียวกัน เทียบจากหลอดกับสเปกตรัมAM1.5



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงชนิดผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน

ตารางที่ 4.4 คุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงชนิดแสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน

Classification	ความเข้มแสง 1,000 W/m ²	
	แรงดันอินพุทของหลอดเป็น 140% ของแรงดันพิกัด	แสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน เมื่อแรงดันอินพุทของหลอดเป็น 120%
Spectral match class	C	B
Non-uniformity class	B	B
Temporal instability class	A	A
Standard classification	CBA	BBA

4.3 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง

ส่วนนี้กล่าวถึง

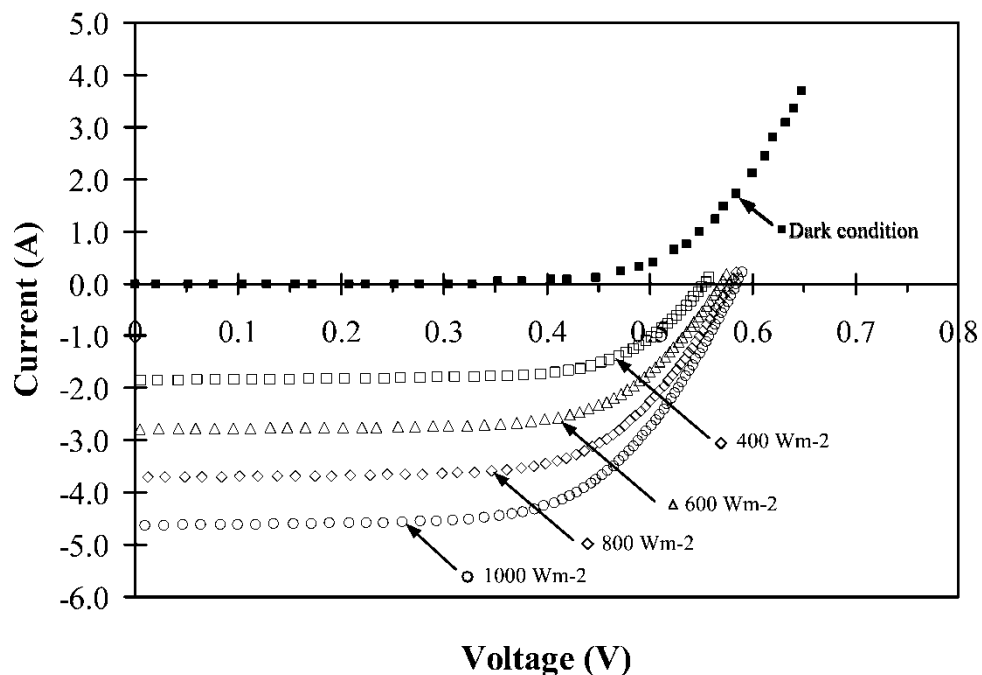
- ก) ผลการวัดลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่างโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานและแหล่งกำเนิดแสงหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนและไดโอดที่พัฒนาขึ้น
- ข) การเปรียบเทียบลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์ระหว่างในกับนอกรัฐมาตรฐาน
- ค) การปรับแก้ค่ากระแส – แรงดันนอกรัฐมาตรฐานไปสู่สภาวะมาตรฐาน

4.3.1 ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกรัฐมาตรฐาน

การศึกษาลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกรัฐมาตรฐาน ประกอบด้วย ก) การวัดในภาวะมืด และข) การวัดด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม Class AAA, แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง, ทั้งสแตนฮาโลเจน และแสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง

4.3.1.1 ผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง

ใช้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชั้นคุณภาพ เอเอเอ หาลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้ม 400 – 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และในภาวะมืด ดังรูปที่ 4.12

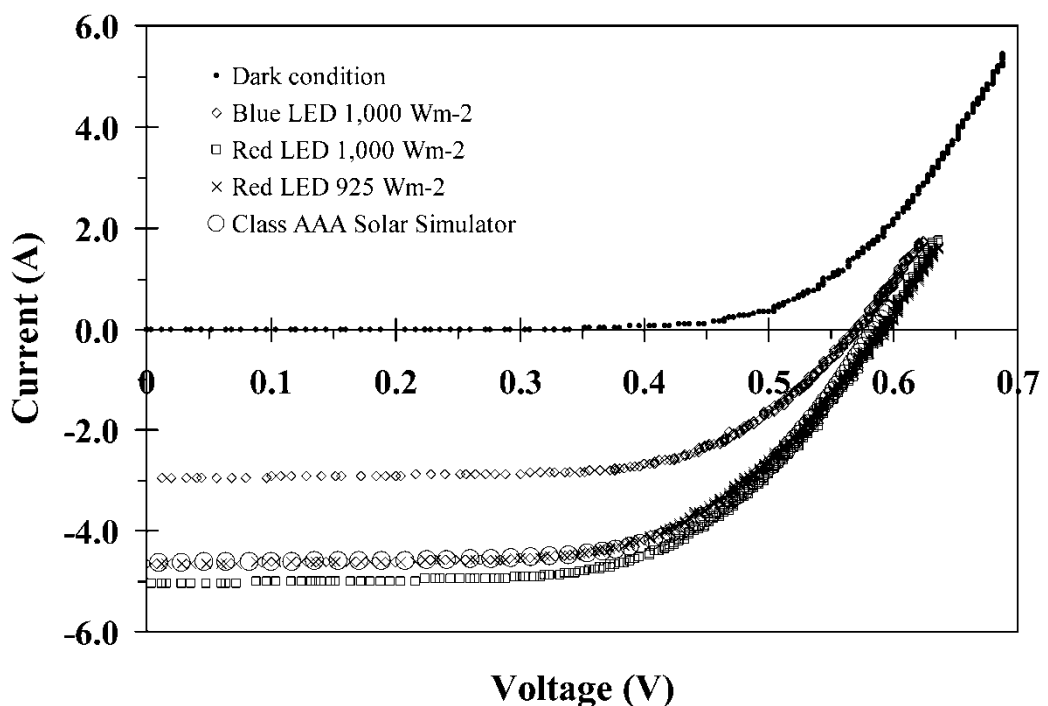


รูปที่ 4.12 ลักษณะกระแส – แรงดันที่วัดด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม Class AAA

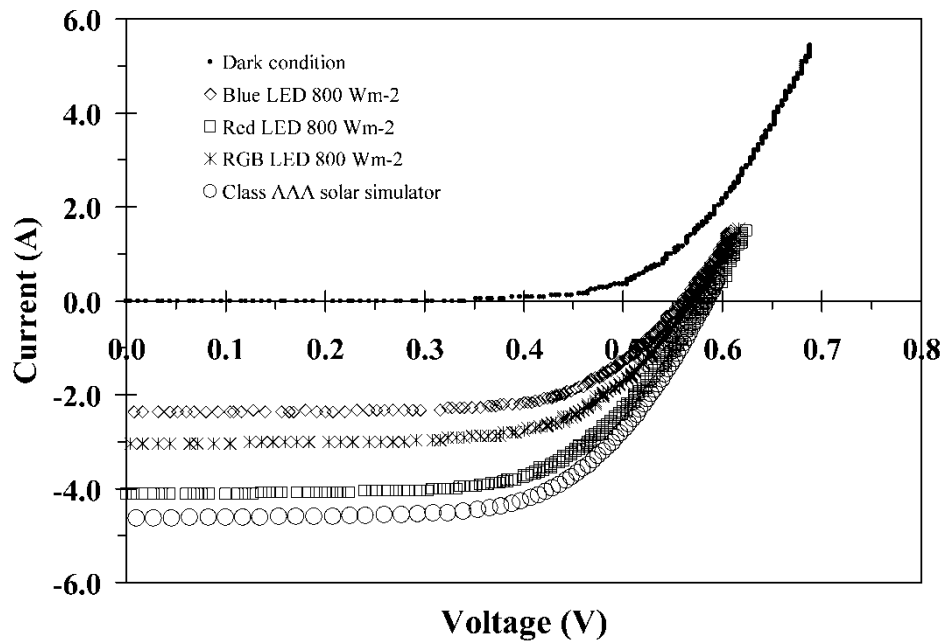
4.3.1.2 ลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงไดโอดเปล่งแสงพัลส์แรงดันสูง เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถูกวัดลักษณะกระแส - แรงดันในช่วง 400 ถึง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ด้วยไดโอดเปล่งแสงพัลส์สีแดง สีน้ำเงิน สีเขียว สีขาว และสีผสม และแสดงผลได้ ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15

ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร แสงสีแดงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่ากระแสลัดวงจร 5.0 แอมแปร์ โดยประมาณ มีค่าสูงกว่าในภาวะมาตรฐานและสูงกว่าค่ากระแสลัดวงจรภายใต้แสงสีน้ำเงิน เนื่องจากความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร โฟตอนแสงสีแดงมีพลังงานต่ำกว่า โฟตอนแสงสีน้ำเงิน จึงทำให้แสงสีแดงมีจำนวนโฟตอนมากกว่าแสงสีน้ำเงิน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่ใช้เป็นตัวอย่างนี้ มีประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) ได้แสงสีแดงที่สูงกว่าภายใต้แสงสีน้ำเงิน

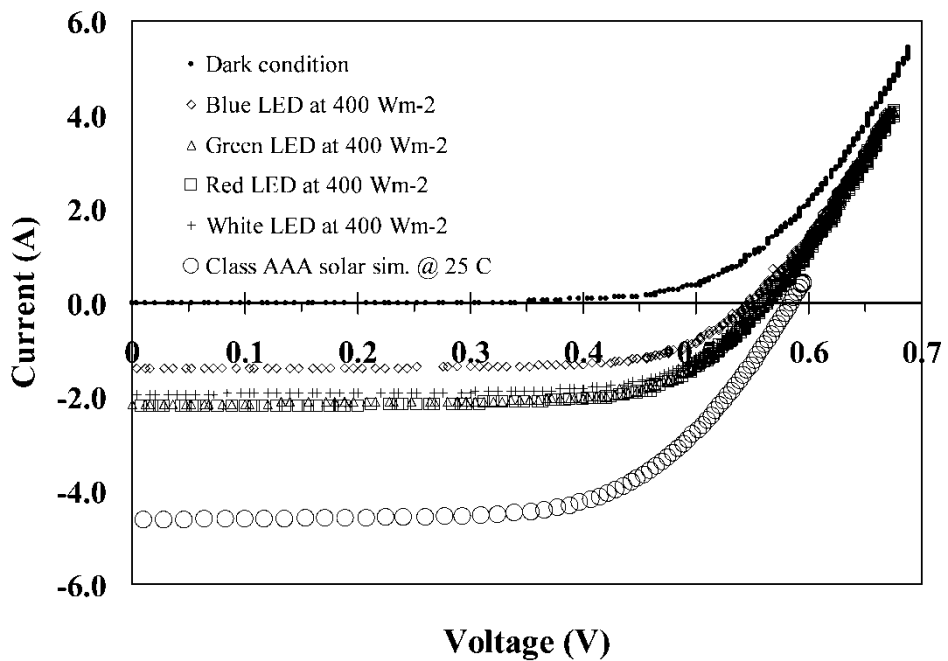
เช่นเดียวกัน ที่ความเข้มแสง 800 และ 400 วัตต์ต่อตารางเมตร ลักษณะกระแส – แรงดันภายใต้แสงไดโอดเปล่งแสง แสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.13 ลักษณะกระแส-แรงดันภายใต้แสงสีแดง ความเข้มแสง 925 และ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.14 ลักษณะกระแส – แรงดัน ของเซลล์ภายใต้แสงไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินและสีผสม



รูปที่ 4.15 ลักษณะกระแส-แรงดันภายใต้แสงไดโอดสีแดง ความเข้ม 400 วัตต์ต่อตารางเมตร

กราฟกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากัน ถูกวัดด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาว ที่ความเข้มแสง 220, 250, 388 และ 308

วัดค่าต่อตารางเมตร ตามลำดับ เพื่อนำไปใช้ในการประเมินลักษณะกระแส – แรงดัน และค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.16 ผลการศึกษา พบว่า ภายใต้อุณหภูมิและค่ากระแสลัดวงจร (ค่ากระแสแสง) ของเซลล์เท่ากัน เซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะกระแส – แรงดันไม่แตกต่างกัน

ดังนั้น ผลการศึกษานี้ก็นำไปใช้หาพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สเปกตรัมที่แตกต่างกันได้ เช่น แสงสีแดง (เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพควอนตัมดีกว่าสีอื่น) มาทดสอบสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แทนแสงสีอื่น ซึ่งจะช่วยให้ใช้พลังงานในการทดสอบน้อยกว่าและได้ผลไม่ต่างกัน เป็นต้น ทั้งนี้เพราะว่า เมื่อกำหนดให้ค่ากระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากันและอุณหภูมิไม่ต่างกัน ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไปตามสมการของ Shockley ดัง (2.1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมมีผลต่อขนาดของกระแสแสง แต่ไม่มีผลต่อลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือพารามิเตอร์อื่นในสมการ



รูปที่ 4.16 ลักษณะกระแส-แรงดันภายใต้แสงไดโอดเปล่งแสงที่มีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากัน

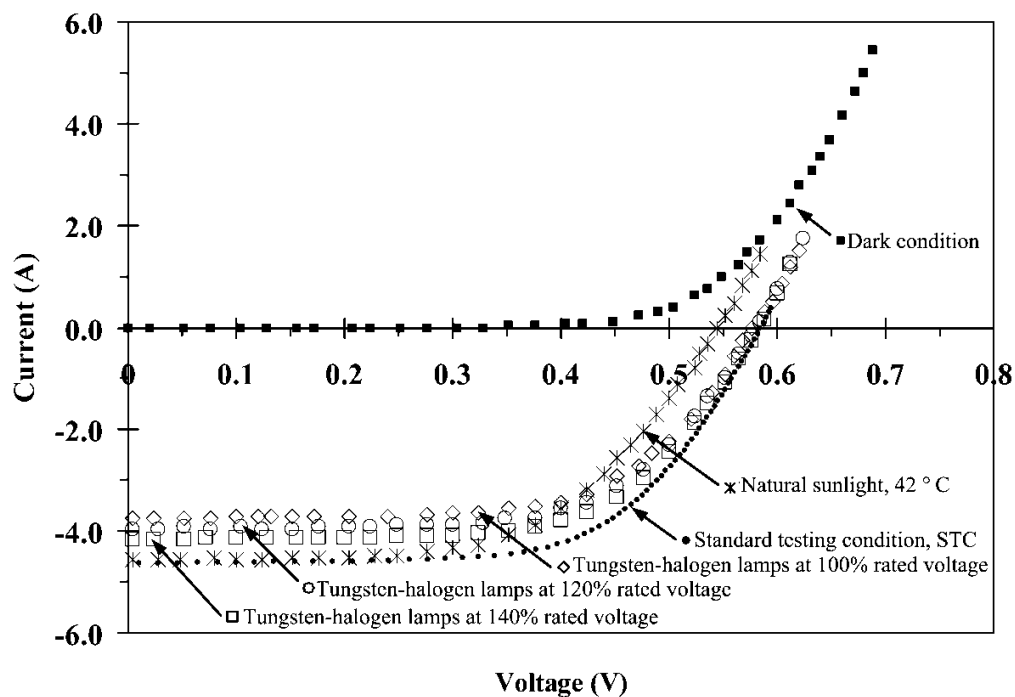
4.3.1.3 ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงทั้งสเดนฮาโลเจนและแสงผสม

กราฟกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงทั้งสเดนฮาโลเจน ที่ป้อนแรงดันโหลด 100% 120% และ 140% สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17

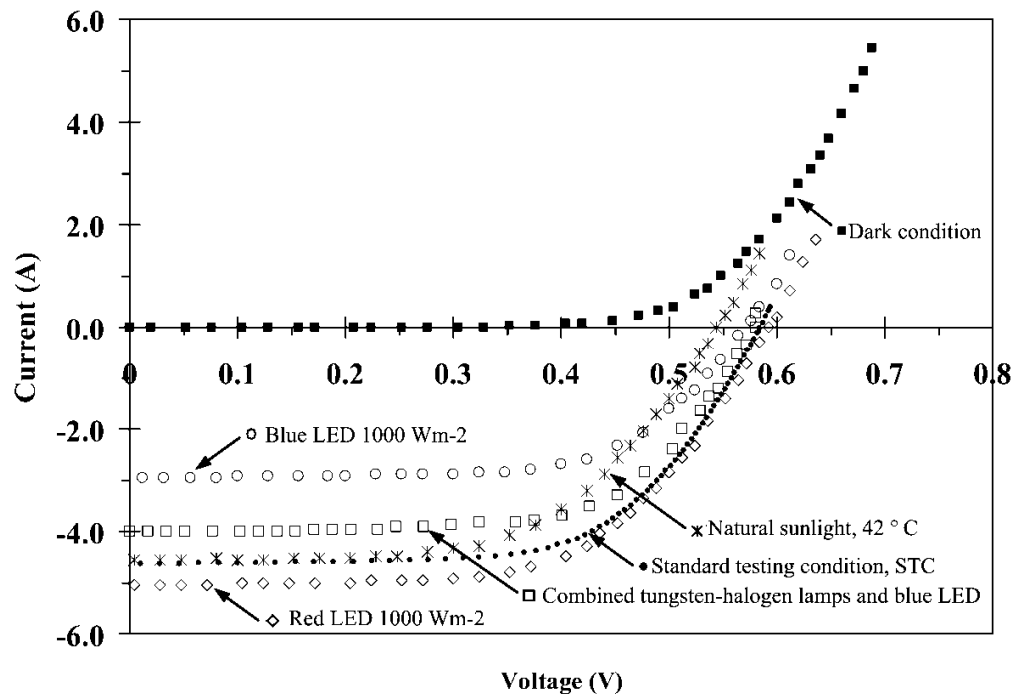
ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มแรงดันหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงกว่า ณ ค่าแรงดันหลอดต่ำ เนื่องจากสเปกตรัมเลื่อนค่าสูงสุดไปในย่านแสงสีน้ำเงินมากขึ้น และ ที่แรงดัน 140% ของพิกัด มีผลทดสอบใกล้เคียงกับลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมาตรฐาน มากกว่าที่ป้อนแรงดันหลอดต่ำ

กราฟกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง ดังรูปที่ 4.18 มีค่ากระแสลัดวงจรต่ำกว่าผลการทดสอบในภาวะมาตรฐาน เนื่องจากสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองมีลักษณะแตกต่างกัน ผลการทดสอบภายใต้แสงธรรมชาติมีค่ากระแสลัดวงจรใกล้เคียงกับผลการทดสอบในภาวะมาตรฐาน เนื่องจากมีสเปกตรัมที่สอดคล้องกัน

ผลการทดสอบภายใต้แสงธรรมชาติให้ค่าแรงดันเปิดวงจรต่ำกว่า เนื่องจากอุณหภูมิเซลล์สูงกว่า ภาวะมาตรฐาน เนื่องจากการทดสอบภายนอกอาคารด้วยแสงธรรมชาติ ไม่ได้มีควบคุมอุณหภูมิของเซลล์



รูปที่ 4.17 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์ภายใต้แสงทั้งสแตนฮาโลเจนที่แรงดันต่างกัน



รูปที่ 4.18 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์ภายใต้แสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง เทียบกับแสงธรรมชาติ แสงไดโอด และแสงมาตรฐาน

แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจน และชนิดแสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมที่มีราคาถูกและสามารถสร้างขึ้นได้เอง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ แม้ว่าจะสามารถสร้างแหล่งได้ในชั้นคุณภาพ CBA และ BBA แต่ผลการวัดลักษณะกระแส – แรงดันนอกภาวะมาตรฐานดังที่แสดงไว้ข้างต้นนี้ มีค่าแตกต่างจากผลทดสอบในภาวะมาตรฐาน เนื่องจาก สเปกตรัมแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมที่ประดิษฐ์ขึ้น มีความแตกต่างสเปกตรัมมาตรฐาน ไออีซี 60904-3 [97] ผลการทดสอบที่ได้ เป็นลักษณะกระแส – แรงดันที่วัดได้ทางกายภาพในภาวะทดสอบเฉพาะ จึงยังไม่สามารถนำไปใช้อ้างอิงเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

เพื่อให้สามารถอ้างอิงผลการวัดลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ เปรียบเทียบสมรรถนะ สมบัติ หรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าผลการวัดนอกภาวะมาตรฐานเหล่านี้ ไปสู่ค่าในภาวะมาตรฐาน โดยใช้วิธีมาตรฐาน ไออีซี 60891 [63]

4.3.1.4 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐาน

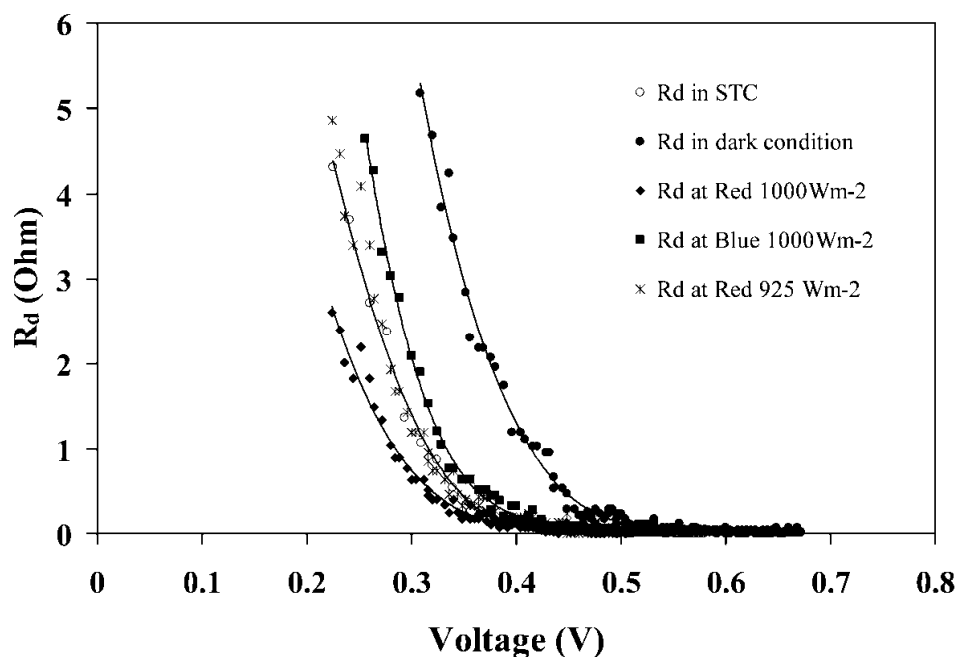
พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ค่ากระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร กำลังงานสูงสุด ฟิลแฟคเตอร์ และความต้านทานไดนามิกภายใน เป็นต้น คำนวณได้จากลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐาน และแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐานเทียบกับ
ในภาวะมาตรฐาน (ไม่ได้ปรับแก้ค่า)

Parameters	Light Sources							
	Tungsten-halogen lamps under three supply voltages			Red LED	Blue LED	Combined tungsten halogen and LEDs	Natural sunlight	Class AAA (STC)
	100% rated voltage	120% rated voltage	140% rated voltage					
G ($W \cdot m^{-2}$)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1002
T (C)	25	25	25	25	25	25	25	25
V_{oc} (V)	0.58	0.58	0.58	0.59	0.57	0.58	0.54	0.58
I_{sc} (A)	3.76	3.96	3.92	5.04	2.96	3.64	4.56	4.63
P_{max} (W)	1.40	1.46	1.45	1.81	1.10	1.43	1.47	1.72
V_{mp} (V)	0.42	0.44	0.41	0.42	0.42	0.44	0.36	0.42
I_{mp} (A)	3.36	3.28	3.52	4.28	2.6	3.24	4.04	4.06
FF (%)	64.5	63.8	63.9	60.8	65.6	68.0	59.3	63.5
η (%)	9.57	10.0	9.9	12.31	7.46	9.52	10.1	11.7
R_s (Ω)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
R_{sh} (Ω)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.08
$R_d @ V_{mp}$ (Ω)	0.13	0.12	0.11	0.05	0.14	0.10	0.09	0.08

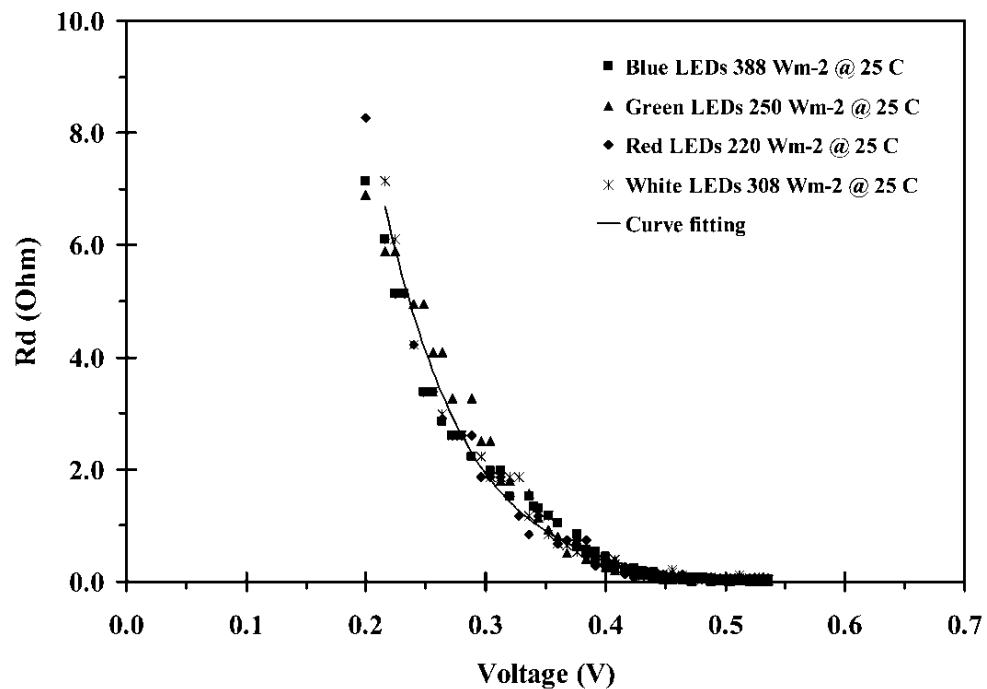
ประสิทธิภาพและฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐาน มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากภายใต้แสงที่มีสเปกตรัมต่างกัน ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตค่ากระแสแสงได้ตามอัตราส่วนของผลคูณระหว่างผลตอบสนองของความเข้มแสง (Spectral response) กับความเข้มแสงในแต่ละความยาวคลื่น (เช่นเดียวกับ ผลคูณของประสิทธิภาพควอนตัม กับจำนวนโฟตอนในแต่ละความยาวคลื่น)

ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร จากแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมต่างชนิดกัน ค่าของความต้านทานไดนามิกภายใน ณ จุดกำลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.19 พบว่า ค่าความต้านทานไดนามิกภายในที่ภาวะมืดมีค่าสูงกว่าในภาวะสว่าง สอดคล้องกับการศึกษาของ จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน และคณะ [45 – 47] และ ยังพบว่า ที่ระดับความเข้มแสงเดียวกัน แต่สเปกตรัมต่างกัน เซลล์แสงอาทิตย์ มีลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดัน และค่าความต้านทานไดนามิก ณ จุดกำลังงานสูงสุดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.19 ลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดัน ภายใต้ความเข้มและสเปกตรัมแสงต่างกัน

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกทดสอบลักษณะกระแส – แรงดัน ด้วยความเข้มและสเปกตรัมแสงต่างกัน แต่มีค่ากระแสลัดวงจร (กระแสแสง) เท่ากัน นอกจากทำให้ลักษณะกระแส – แรงดัน ไม่แตกต่างกัน (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.1.2) แล้ว ยังทำให้ลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.20 การศึกษาในประเด็นนี้ เป็นการขยายขอบเขตการศึกษาจากเดิมที่ทดสอบเฉพาะในภาวะมืดและภาวะทดสอบมาตรฐานเท่านั้น [45 – 47]



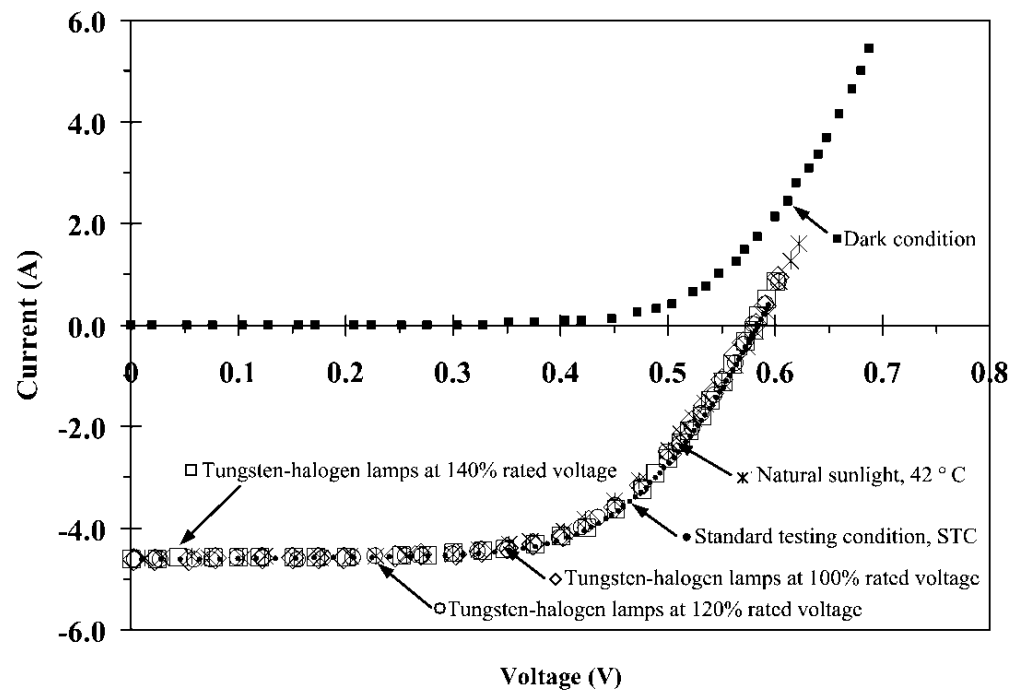
รูปที่ 4.20 ลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดัน ที่ภาวะกระแสลัดวงจรเท่ากัน

4.3.2 การปรับแก้ค่าลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกภาวะมาตรฐาน ไปสู่ภาวะมาตรฐาน

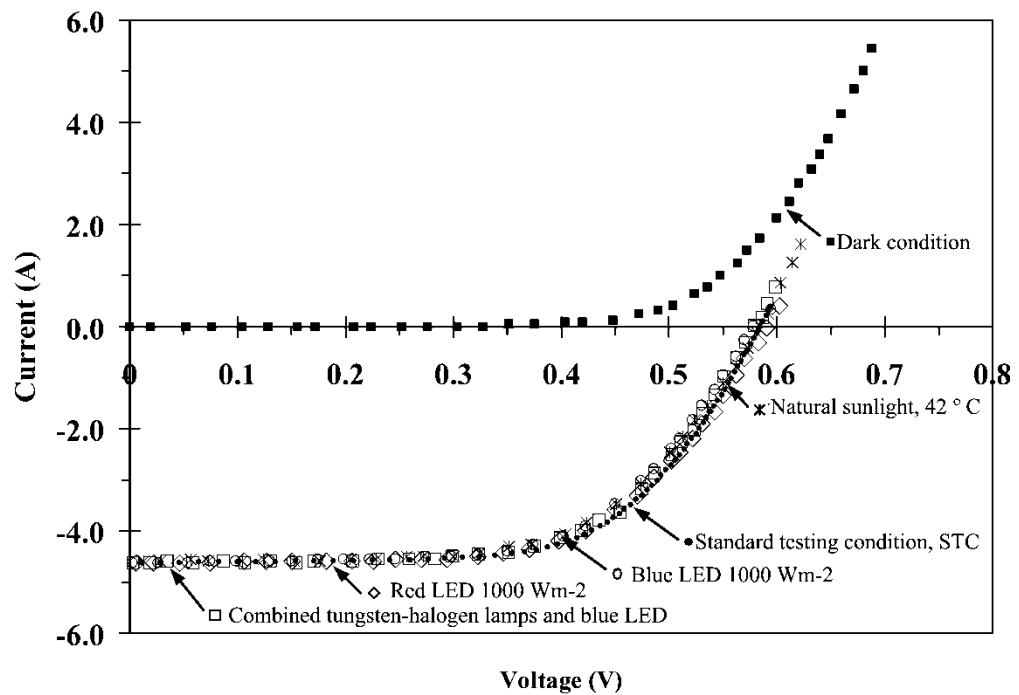
ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐาน ที่ปรับแก้ค่าด้วยวิธีการตามมาตรฐาน ไออีซี 60891 มีลักษณะกระแส – แรงดันสอดคล้องกับผลทดสอบในภาวะมาตรฐาน ดังรูปที่ 4.21 – 4.23

ความเข้มแสงสีแดง 925 วัตต์ต่อตารางเมตร (เซลล์มีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากับค่าในภาวะมาตรฐาน) เซลล์มีลักษณะกระแส – แรงดันและพารามิเตอร์ไม่แตกต่างจากผลทดสอบในภาวะมาตรฐาน ยกเว้นประสิทธิภาพ ซึ่งมีค่าสูงกว่า เนื่องจากสัดส่วนระหว่างสเปกตรัมมาตรฐานกับสเปกตรัมของไดโอดมีค่าคงที่ ดังนั้น สัดส่วนของค่าความเข้มมาตรฐาน 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร กับค่าความเข้มแสงในการทดสอบ (925 วัตต์ต่อตารางเมตร) จึงถูกคูณเข้ากับค่าประสิทธิภาพเพื่อปรับแก้ค่า

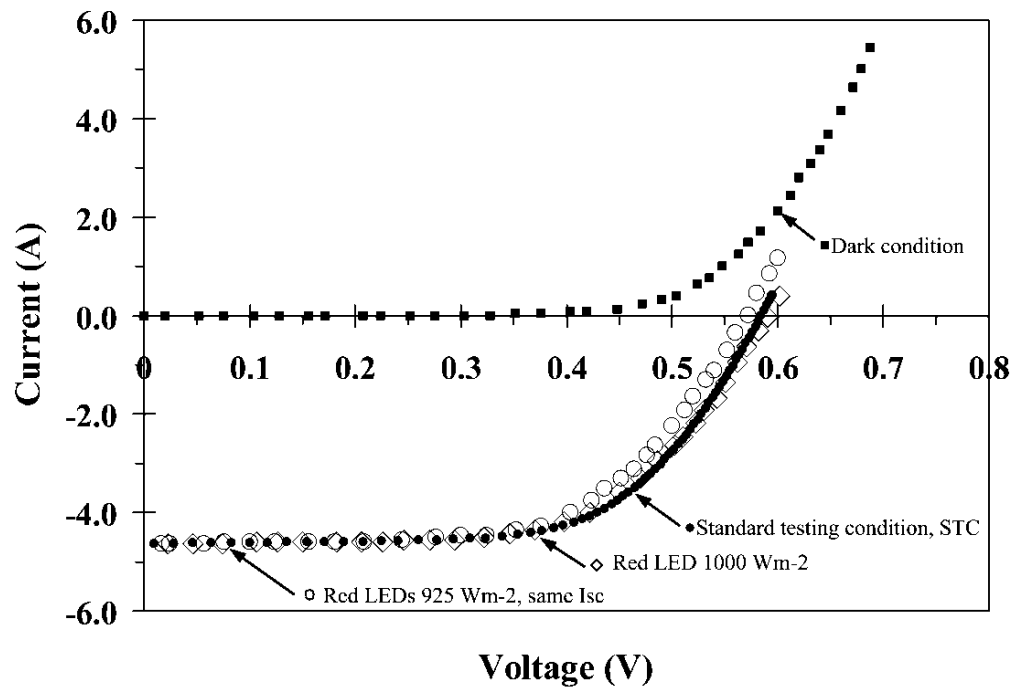
การศึกษาในประเด็นนี้ เป็นแนวทางใหม่เพื่อการปรับแก้ค่าลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดสอบด้วยสเปกตรัมเดี่ยวของไดโอด ซึ่งต่างจากผลการศึกษาก่อน [35, 64-65, 67-77] และ ช่วยให้ประมาณค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ทดสอบภายใต้สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงได้



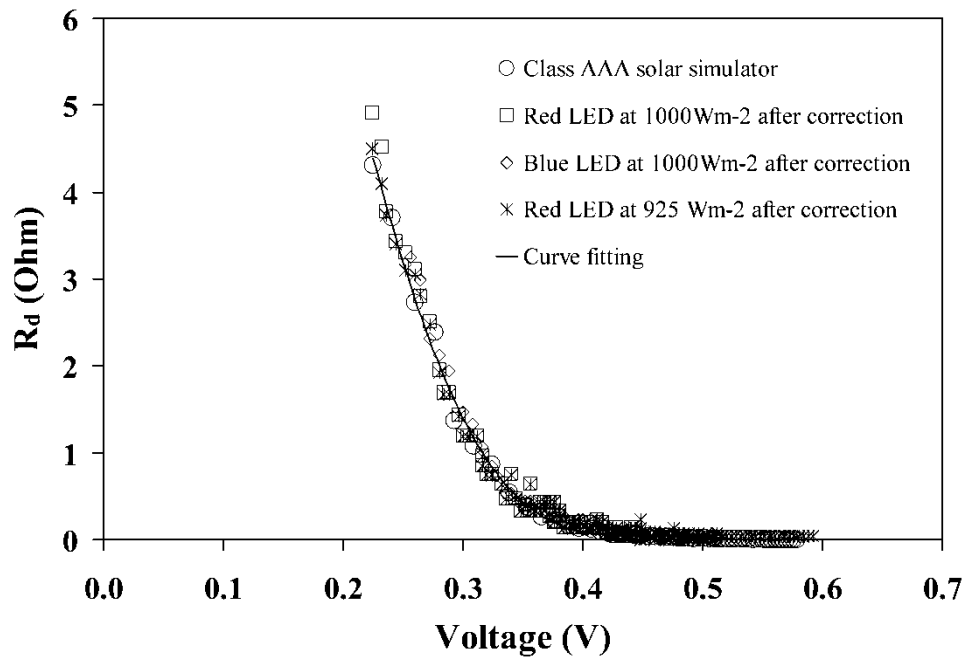
รูปที่ 4.21 ลักษณะกระแส - แรงดันในภาวะมืด ภาวะมาตรฐาน และแสงทั้งสแตนฮาโลเจน ที่ปรับแก้ค่าแล้ว



รูปที่ 4.22 ลักษณะกระแส - แรงดันในภาวะมืด ภาวะมาตรฐาน และแสงไดโอดเปล่งแสงสีแดง และน้ำเงิน ความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่แก้ค่าไปสู่ภาวะมาตรฐานแล้ว



รูปที่ 4.23 ลักษณะกระแส – แรงดันภายใต้ไดโอดเปล่งแสงสีแดง 925 วัตต์ต่อตารางเมตร (ไม่ปรับแก้ค่า)



รูปที่ 4.24 ความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หลังปรับแก้ค่า

4.4 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกไบแอสด้วยแสงทั้งสแตนด์บาย (ความเข้มสูง) และแสงไบแอสบางส่วน จากไดโอดเปล่งแสง (ความเข้มต่ำ) แล้ว ต่อเซลล์กับโหลดความต้านทาน ปรับแรงดันที่ขั้วให้มีค่าตามกำหนด ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในบทที่ 3 ส่วนที่ 3.5.2

หลังจากนั้น มอดูเลตความเข้มแสงให้กับเซลล์ สัญญาณมอดูเลตเป็นไซน์ซอซายดัล คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม คลื่นฟันเลื่อย เพื่อวัดผลตอบสนองระหว่างกระแสแสงกับแรงดันที่ขั้วของเซลล์

ขนาดและเฟสของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ณ ค่าแรงดันจุดทำงานที่กำหนด หาค่าจากสัดส่วนของสัญญาณที่ได้จากวิเคราะห์ฟูรีเยร์ทราซฟอร์ดัม ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในบทที่ 3 ส่วนที่ 3.5.3 ดังนี้

4.4.1 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ณ จุดกำลังงานสูงสุด

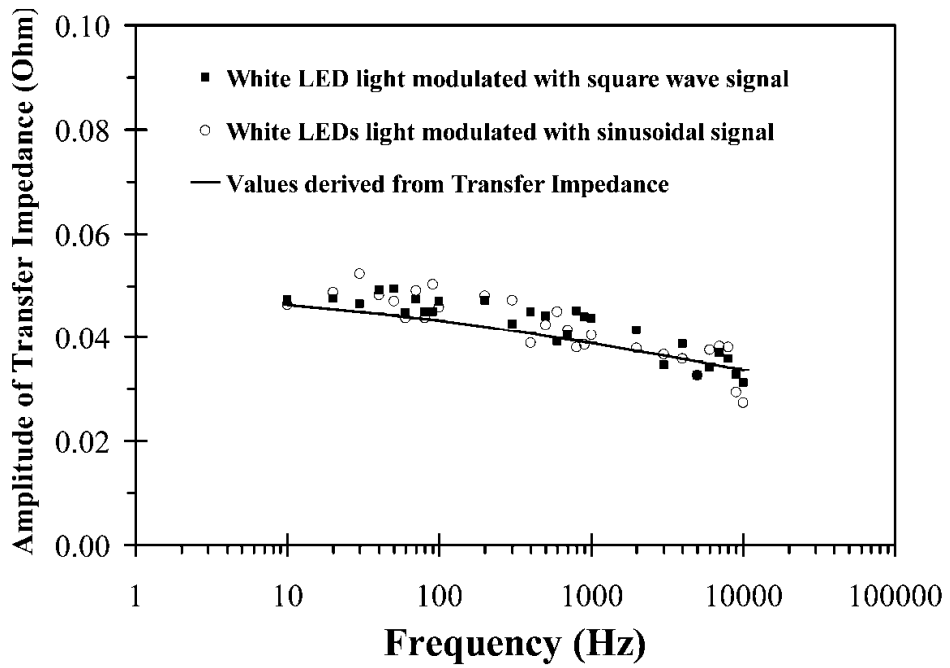
เซลล์แสงอาทิตย์ถูกทดสอบ ณ ค่าแรงดันจุดกำลังงานสูงสุด ซึ่งมีค่า 400 mV โดยประมาณ การมอดูเลตโดยใช้แสงขาวของไดโอดเปล่งแสงด้วยอัตราส่วนไม่เกิน 2% ทำให้ได้อัมพลิจูดทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.25

ในการวิจัยใช้สัญญาณมอดูเลตเป็นคลื่นสี่แบบ คือคลื่นไซน์ซอซายดัล คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม คลื่นฟันเลื่อย แต่ในการรายงานจะแสดงเฉพาะผลจากคลื่นสองแบบคือ คลื่นไซน์ซอซายดัลและคลื่นสี่เหลี่ยม เท่านั้น แต่ในอนาคตจะรายงานผลการทดลองกับรูปคลื่นแบบอื่นต่อไป

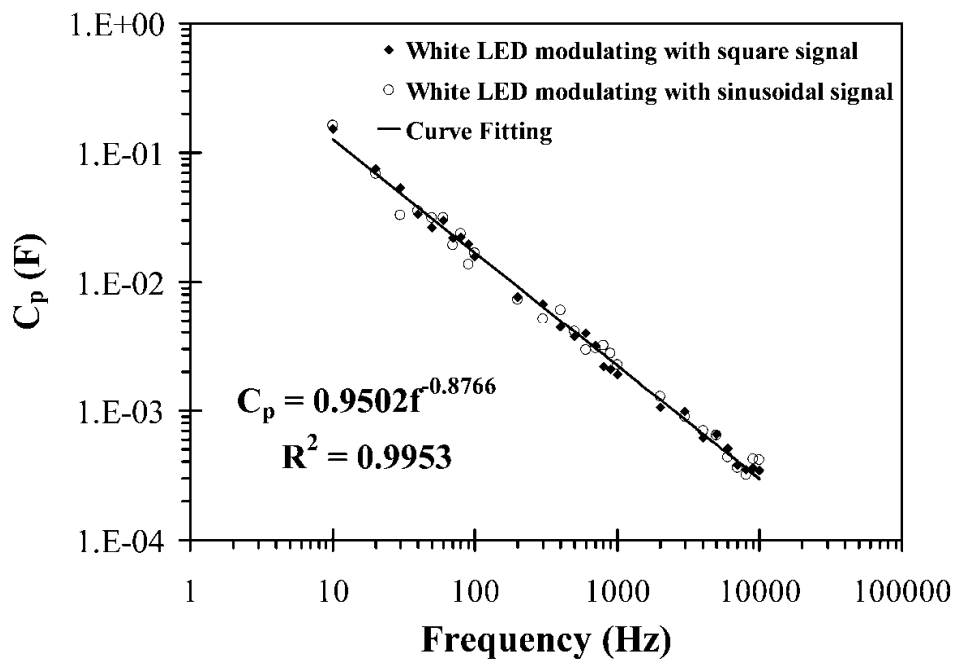
4.4.1.1 สัญญาณมอดูเลตแสงไดโอดสีขาวเป็นคลื่นไซน์ซอซายดัลและคลื่นสี่เหลี่ยม

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อมอดูเลตด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยมและไซน์ซอซายด์ อัมพลิจูดของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ไม่แตกต่างกัน และการคำนวณอัมพลิจูดของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ด้วยสมการที่ (2.43) ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

ค่าคาปาซิแตนซ์รวม (C_p) ของเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณโดยใช้สมการที่ (2.46) ด้วยพารามิเตอร์ที่รู้ค่า ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อมอดูเลตแสงสีขาวคลื่นไซน์ซอซอคาและคลื่นสี่เหลี่ยม



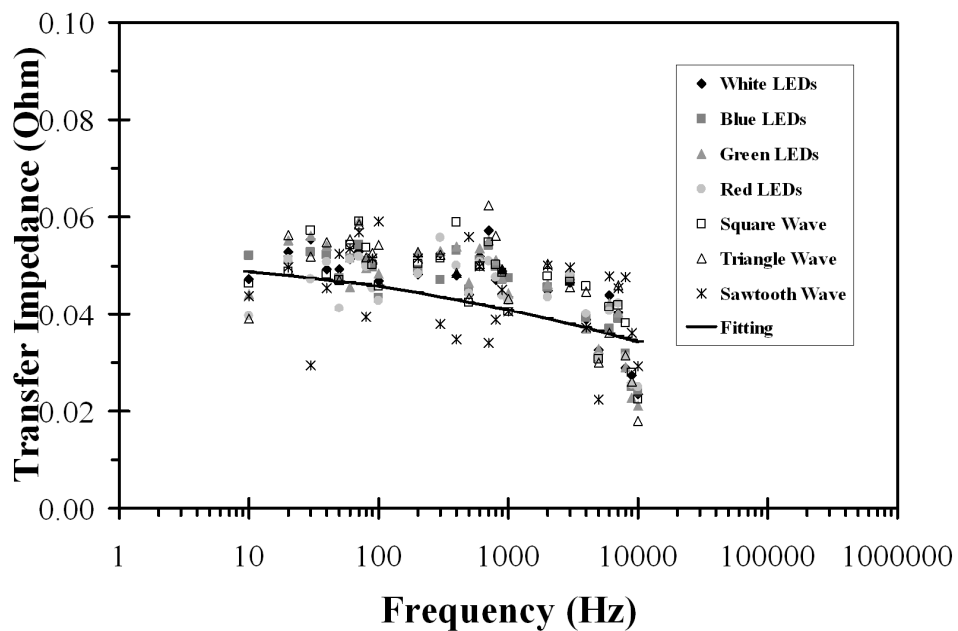
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างของคาปาซิแตนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อสัญญาณมอดูเลตแสงสีขาวเป็นคลื่นไซน์ซอซอคาและคลื่นสี่เหลี่ยม

4.4.1.2 สัญญาณมอดูเลตแสงไดโอด เป็นคลื่นไซน์ซอซอคาและคลื่นสี่เหลี่ยม

เพื่อเปรียบเทียบผลของสัญญาณมอดูเลตความเข้มแสง (สีขาว น้ำเงิน เขียว แดง) ได้หาทรานส์เฟอร์ อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้สัญญาณคลื่นไซน์ซอซอค สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และฟันเลื่อย ด้วยอัตราส่วนการมอดูเลตไม่เกิน 2% และวิเคราะห์ผลด้วยฟาสต์ฟูเรียทรานฟอร์ม ดังรูปที่ 4.27

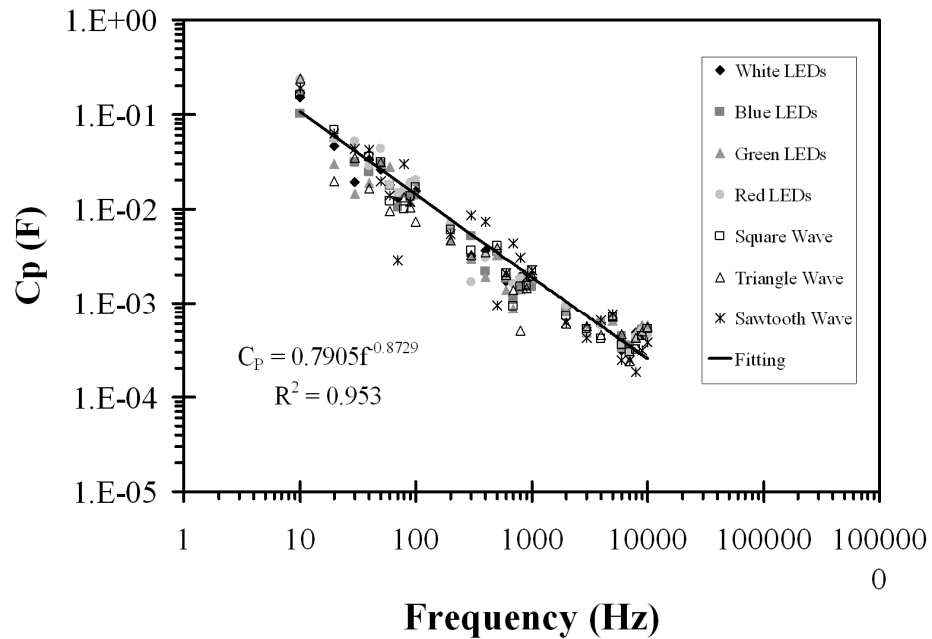
ผลการศึกษาพบว่า การทดสอบมอดูเลตความเข้มแสงด้วยสัญญาณคลื่นที่มีรูปร่างต่างกัน หาความสัมพันธ์ระหว่างทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์กับความถี่ เมื่อวิเคราะห์ด้วยฟาสต์ฟูเรียทรานส์ฟอร์ม มีลักษณะไม่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ การมอดูเลตความเข้มแสงที่มีสเปกตรัมต่างกันของแสงไดโอดสีน้ำเงิน สีเขียว สีแดง และสีขาวในสัดส่วนไม่เกิน 2% พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ – ความถี่ มีลักษณะไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อสัญญาณมอดูเลตแสงสีขาว น้ำเงิน เขียว แดง เป็นคลื่นไซน์ซอซอคา คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม และคลื่นฟันเลื่อย

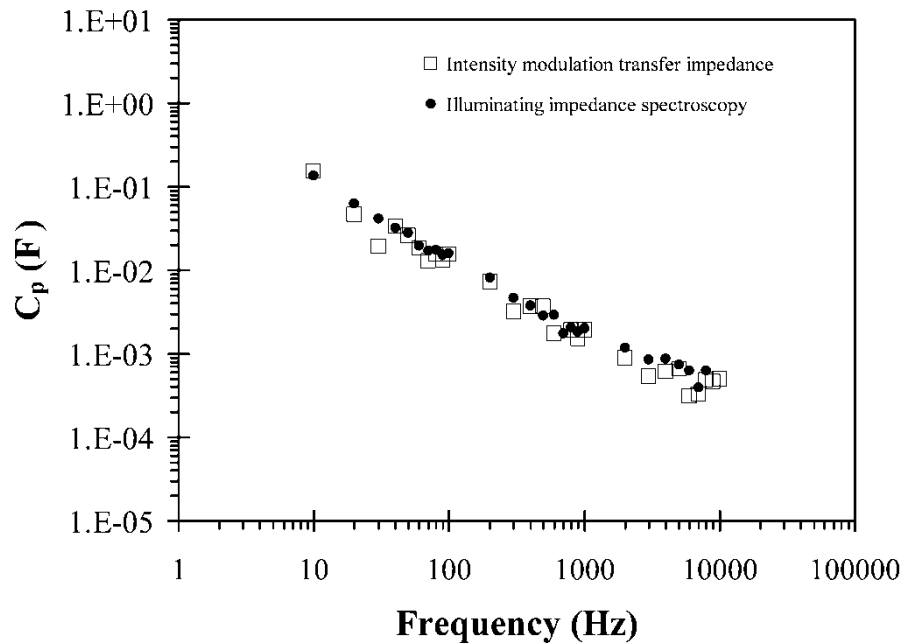
ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์กับความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่หาค่าจากผลทดสอบ ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ มีลักษณะไม่แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อสัญญาณมอดูเลตแสงสีขาว น้ำเงิน เขียว แดง เป็นคลื่นไซน์ซอซอคาคล คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม และคลื่นฟันเลื่อย

4.4.1.3 ทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์จากการมอดูเลตแสงและเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปคโตรสโคปี

โดยทั่วไปแล้ว ความเข้มแสงในการมอดูเลตอยู่ในระดับประมาณ 10% ในการศึกษาก่อนหน้านี้ มีสัดส่วนการมอดูเลตสัญญาณแตกต่างกัน คือ 1% 10% และ 46% [54, 53, 96] การมอดูเลตความเข้มแสงในการศึกษานี้ มีระดับไม่เกิน 2% ถือว่าอยู่ในระดับต่ำและอยู่ในเกณฑ์ทั่วไป การมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เซลล์ไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณมอดูเลต เซลล์จึงได้รับเฉพาะผลจากสัญญาณไบอัส (ค่าความเข้มแสงและแรงดันที่ขั้ว) ทำให้ค่าพารามิเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น การมอดูเลตความเข้มแสงที่มีรูปคลื่นและสเปกตรัมแตกต่างกัน จึงไม่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างทรานส์เฟอร์กับความถี่ และคาปาซิแตนซ์กับความถี่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์กับความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดสอบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการทดสอบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ มีข้อค้นพบที่สำคัญดังนี้

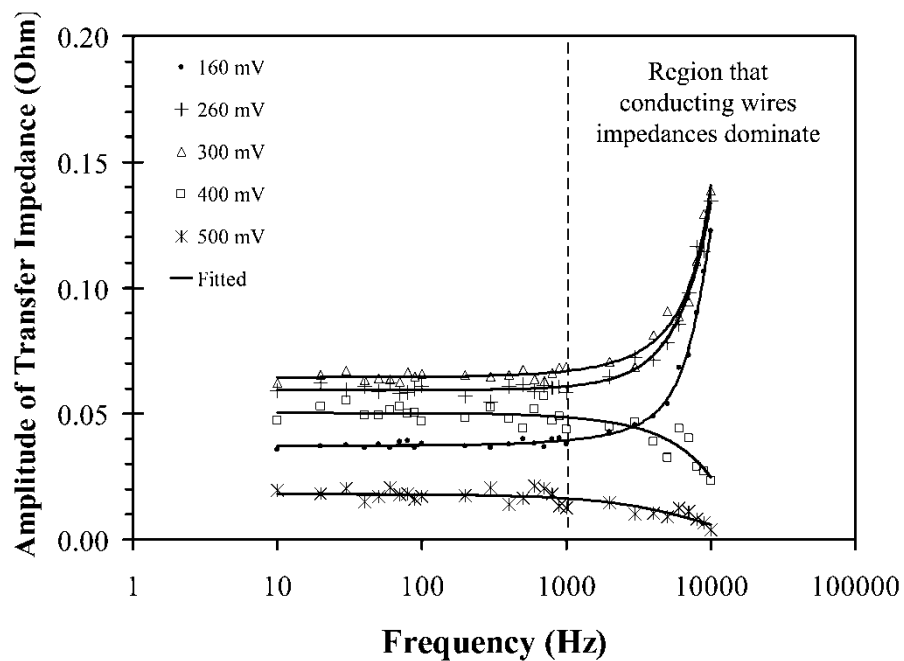
(ก) การวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์โดยใช้เทคนิค 2 พอร์ต (2-port analysis) ที่สัญญาณอินพุตเป็นกระแสไฟโต (เนื่องจากแสงที่ตกกระทบ) สัญญาณเอาพุตเป็นแรงดัน ให้ผลสอดคล้องกับการวัดค่าโดยตรง ด้วยวิธีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์แบบ 1 พอร์ต (1-port analysis) ที่สัญญาณอินพุตเป็นกระแสที่ไหลผ่าน สัญญาณเอาพุตเป็นแรงดันตกคร่อมเซลล์ ที่เสนอก่อนหน้านี้ [49, 55, 56, 81, 83, 84] ลักษณะความสัมพันธ์คาปาซิแตนซ์ – ความถี่ ไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.29

(ข) โมเดลไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์ (วงจรมูลของเซลล์แบบกระแสลับ) ดังรูปที่ 2.3 ถึง รูปที่ 2.5 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทั้งแบบ 1 พอร์ต และ 2 พอร์ต ให้ค่าพารามิเตอร์ไดนามิกเดียวกัน

ทั้งสองประเด็น เป็นข้อค้นพบใหม่ที่ยังไม่เคยมีการรายงานมาก่อน

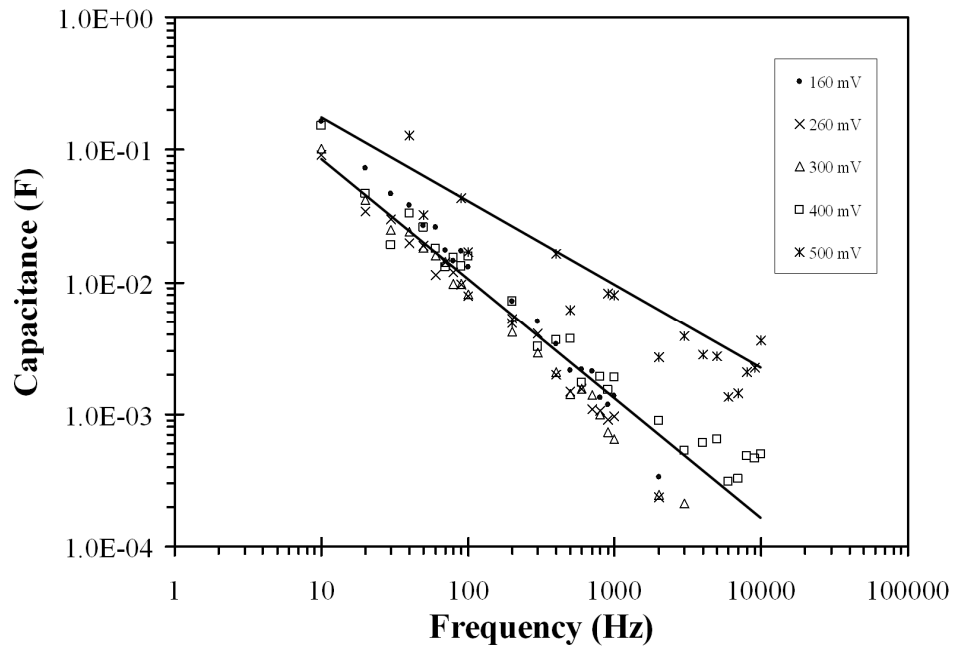
4.4.2 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดทำงานอื่น

ผลการวัดลักษณะพลวัตทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์ ณ จุดทำงานอื่น แสดงได้ดังรูปที่ 4.30 การวัดทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์นี้ สามารถนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังรูปที่ 4.31 คาปาซิแตนซ์เมื่อเซลล์ถูกไบแอสที่แรงดัน 160, 260, 300 และ 400 mV มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่แรงดัน 500 mV ค่ากระจาย ซึ่งยังอธิบายไม่ได้



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ – ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจุดกำลังงานสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า ช่วงความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 1kHz) อิมพลีจูดของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์มีค่าค่อนข้างคงที่ เป็น resistive component แต่ในช่วงความถี่สูง (เป็น kHz) ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลง ไม่เห็นแนวโน้มแน่นอน อาจแสดงว่าระบบที่วัดมีอิมพีแดนซ์อื่นด้วย นอกจากอิมพีแดนซ์ของเซลล์ จึงได้ศึกษาต่อไป

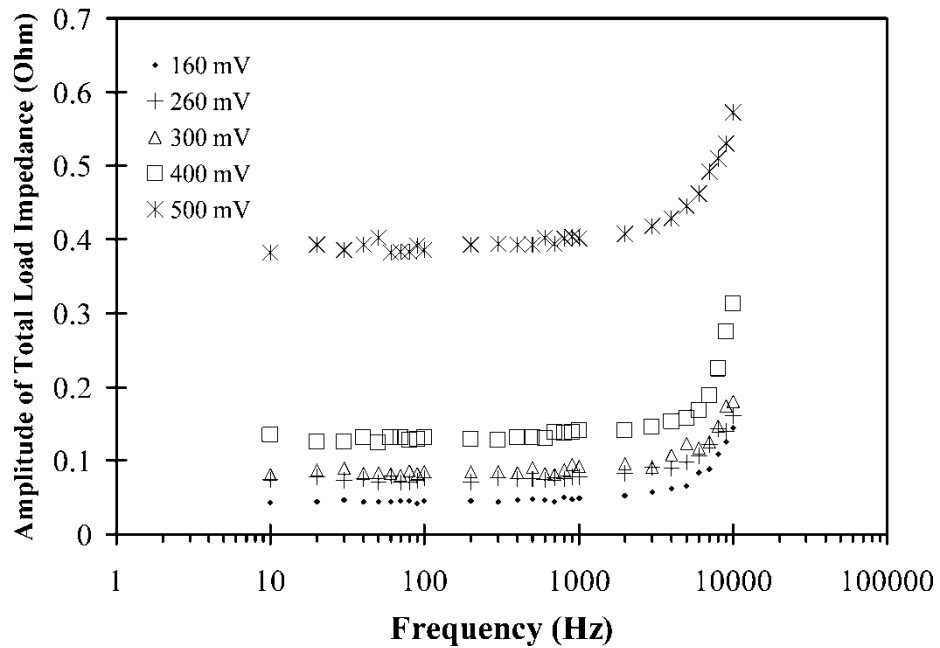


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ กับความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์
นอกจุดกำลังงานสูงสุดเมื่อไบอัสเซลล์ที่แรงดันต่างกัน

อิทธิพลของอิมพีแดนซ์สายวัด

เมื่อพิจารณาที่มาของอิมพีแดนซ์อื่นในระบบการวัดทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์ พบว่าสาเหตุมาจากสายต่อวงจรระหว่างเซลล์กับเครื่องมือวัด สายต่อมีความยาวมาก ประกอบด้วยสายต่อขนานกันหลายเส้น เพื่อลดความต้านทาน ทำให้แรงดันตกในสายมีค่าต่ำ และช่วยให้สามารถควบคุมค่าแรงดันไบอัสของเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในช่วงความถี่สูง สายที่ต่อขนานกันหลายเส้นมีค่าอินดักแตนซ์สูง สร้างอิมพีแดนซ์อีกส่วนหนึ่งเข้าไปในระบบการวัด ซึ่งไม่ได้พิจารณามาก่อน

อิทธิพลของอิมพีแดนซ์โหลด รวมอินดักแตนซ์ของสาย และความต้านทานโหลด แสดงได้ดังรูปที่ 4.32 อิมพีแดนซ์ของสายที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงความถี่สูง มีผลต่อลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์มาก เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานต่ำของโหลดในช่วงความถี่ต่ำ



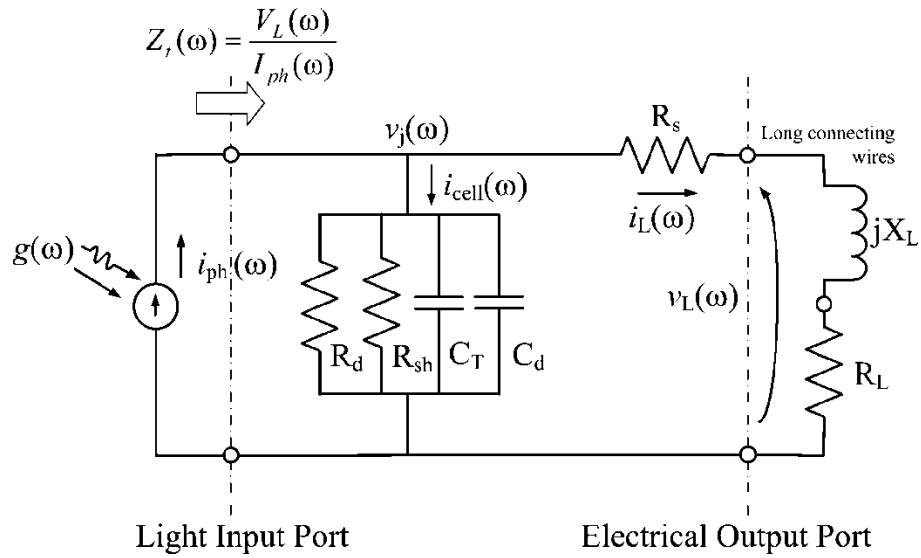
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนส์ – ความถี่ของโหลดรวม(เซลล์แสงอาทิตย์และสายต่อ)

การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์ด้วยวิธีมอดูเลตความเข้มแสง เพื่อวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ และคาปาซิแตนส์ของเซลล์ มีความคล้ายกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [53, 54, 95, 96] ในด้านการเทคนิค การทดสอบมอดูเลตความเข้มแสง ผลงานที่ผ่านมา วิเคราะห์การตอบสนองของประจุไฟฟ้า (กระแส) เพื่อศึกษากลไกและจลนพลศาสตร์การส่งผ่านประจุ ต่างกับการศึกษานี้

มีเฉพาะ Liu et al. เท่านั้น ที่ศึกษาผลตอบสนองของแรงดันซึ่งคล้ายกัน โดยนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ผลของตัวต้านทานอนุกรมที่มีต่อประสิทธิภาพ [53] แต่ในการศึกษานี้ ใช้ผลตอบสนองแรงดันต่อ กระแสแสง มาศึกษาลักษณะพลวัตของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ และหาค่าคาปาซิแตนส์ของเซลล์ แสงอาทิตย์

4.4.3 ตัวแบบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์และคาปาซิแตนส์ที่พิจารณาอิมพีแดนส์ของสาย

ตัวแบบสมการทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์และคาปาซิแตนส์ของเซลล์ที่เสนอไว้ในบทที่ 2 มิได้รวม ผลของอิมพีแดนส์ของสายส่งต่อวงจรระหว่างเซลล์กับเครื่องมือวัด วงจรสมมูลของเซลล์ แบบกระชับ ดังรูปที่ 2.3 ถึง 2.5 จึงควรปรับปรุงใหม่โดยเพิ่มองค์ประกอบของอิมพีแดนส์ในสาย ต่อวงจรของเซลล์เข้าไป ถ้าสายมีความยาวมากพอ และพิจารณาวงจรสมมูลที่ความถี่สูง ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 วงจรสมมูลกระแสสลับ(ปรับปรุงใหม่) สำหรับการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มอิมพีแดนซ์ของสายต่อวงจร และที่ความถี่สูง

จากรูปที่ 4.33 ตัวแบบสมการทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์เดิมดังสมการที่ (2.43) ถูกปรับปรุงใหม่ ดังสมการที่ (4.1)

$$Z_i(\omega) = \frac{(R_L \cdot R_p) \cdot [(R_s + R_L + R_p - \omega C_p R_p X_L) - j(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L + X_L)]}{[R_s + R_L + R_p - \omega C_p R_p X_L]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L + X_L)]^2} \quad (4.1)$$

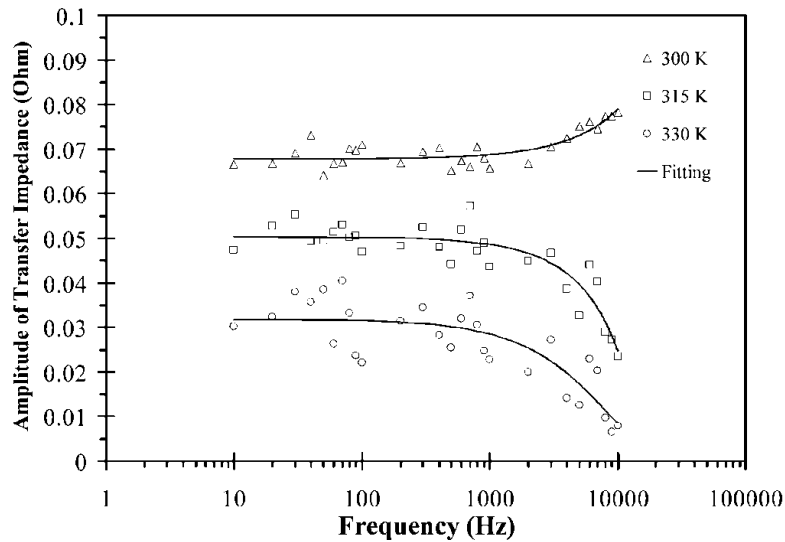
ค่าคาปาซิแตนซ์ที่ประมาณค่าจากผลการทดสอบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.46) ถูกปรับปรุงใหม่ ดังสมการที่ (4.2)

$$C_p \approx \frac{1}{(\omega \cdot R_p) \cdot (R_s + R_L + X_L)} \left[\frac{(R_L \cdot R_p)^2}{|Z_i(\omega)|^2} - [R_s + R_L + R_p]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

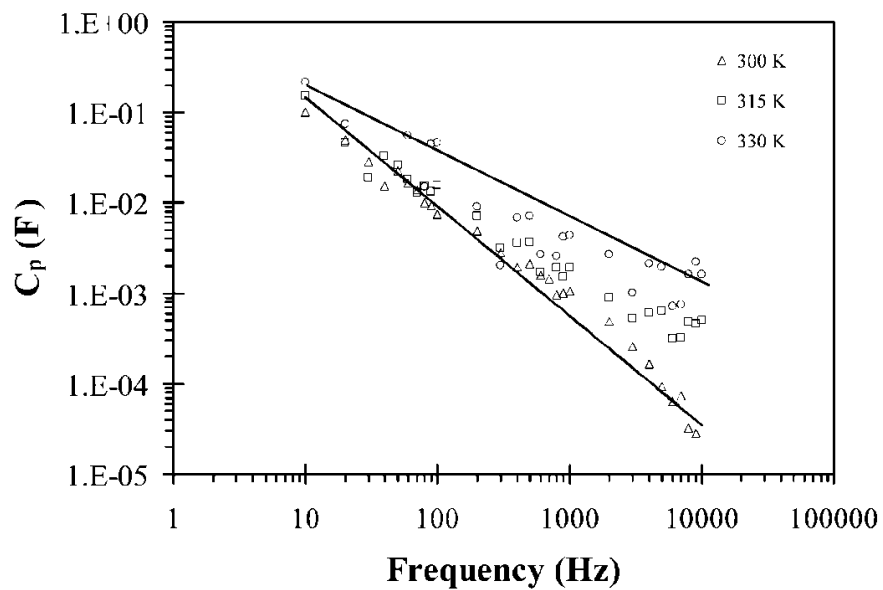
4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – ความถี่ของเซลล์เมื่ออุณหภูมิต่างกัน

เมื่อได้ปรับปรุงตัวแบบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์และนำมาใช้ในการศึกษาทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิ 300, 315 และ 330 K (27, 42, 57 C) ดังรูปที่ 4.34 ผลแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แตกต่างกัน ลักษณะและอัมพลิจูดของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ แตกต่างกันอย่าง

ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แตกต่างกัน คำนวณด้วยสมการที่ (4.2) แสดงได้ดังรูปที่ 4.35 พบว่า ในภาวะสว่าง เมื่ออุณหภูมิเซลล์มีค่าสูงขึ้น คาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นไปลักษณะเดียวกับผลการศึกษา ในภาวะมืด [46, 80, 81, 99]



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างทรานส์เฟอร์อิมแดนซ์ – ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่ออุณหภูมิต่างกัน



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – ความถี่ของเซลล์ เมื่ออุณหภูมิต่างกัน

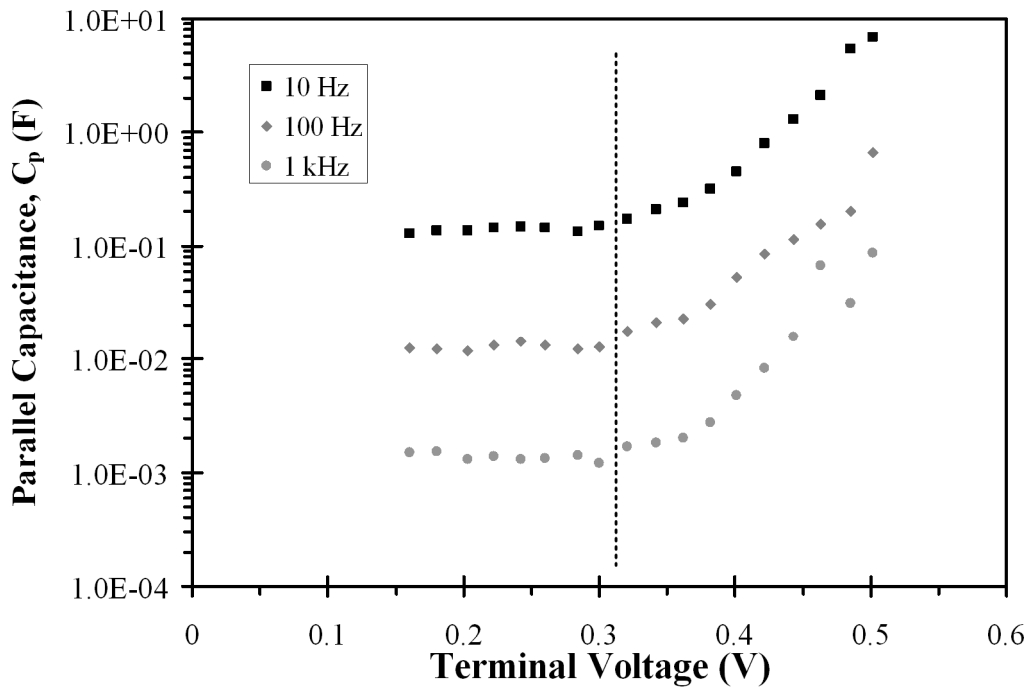
4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะสว่าง

ผลการทดสอบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ที่ค่าแรงดันต่างกัน ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.36 พบว่า ณ ค่าความถี่หนึ่ง คาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ในช่วงแรงดันต่ำ (ประมาณ 0.15 ถึง 3.0 V) และเมื่อแรงดันมีสูงขึ้น (0.3 ถึง 0.5 V) คาปาซิแตนซ์ของเซลล์มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก

ผลการศึกษาข้างต้น โดยรวมมีความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ - แรงดัน คล้ายกับผลการทดสอบเซลล์ซิลิกอนในภาวะมืดในรายงานอื่น ๆ [32, 41, 78-81, 99] แต่เมื่อพิจารณาความชันของกราฟคาปาซิแตนซ์ - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ เทียบกับลักษณะการนำกระแสของเซลล์ซิลิกอนในรายงานก่อนหน้านี้ พบว่า

- ก) ที่ค่าแรงดันต่ำ คาปาซิแตนซ์รวมเกิดจากอิทธิพลของทรานสิชันคาปาซิแตนซ์เป็นหลัก
- ข) เมื่อแรงดันมีค่าสูง อิทธิพลของดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์สูงขึ้น

ทั้งนี้เพราะในภาวะมืด ที่ค่าแรงดันต่ำ เซลล์ยังไม่นำกระแสจึงได้รับอิทธิพลของทรานสิชันคาปาซิแตนซ์ แต่เมื่อเซลล์มีแรงดันสูง นำกระแสมาก และแสดงอิทธิพลของดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์



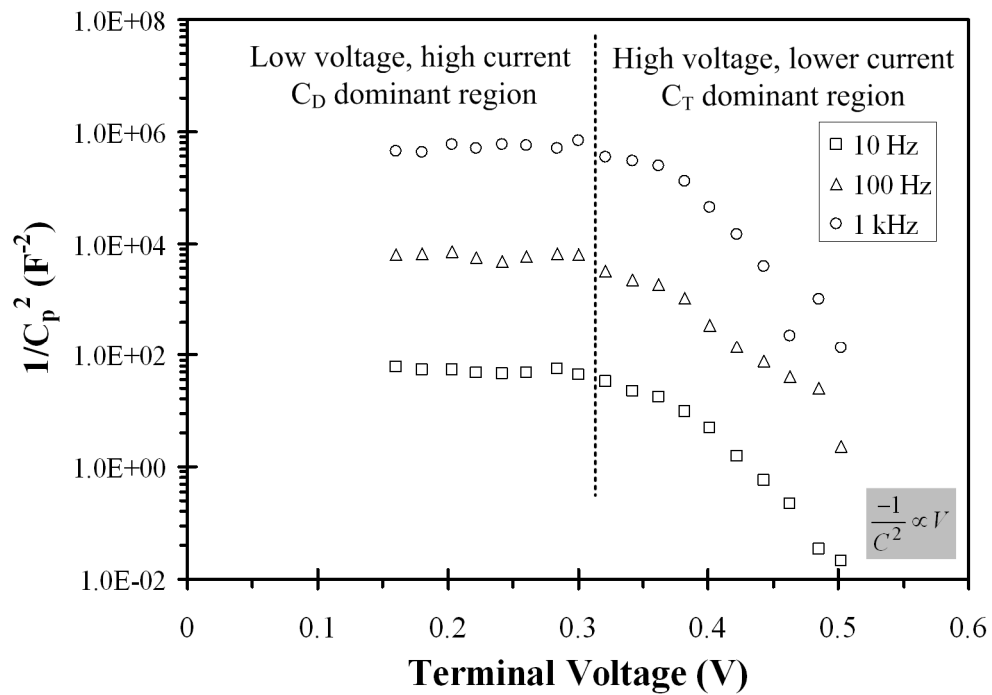
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดกำลังงานสูงสุด ที่ช่วงแรงดันต่ำและแรงดันสูง แสดงอิทธิพลของคาปาซิแตนซ์ที่ต่างกัน

ในทางกลับกัน การศึกษาคาปาซิแตนซ์ของเซลล์ในภาวะสว่างในการศึกษานี้ พบว่า

- ก) ที่ช่วงแรงดันต่ำเซลล์แสดงอิทธิพลจากดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์ และ
- ข) ที่ช่วงค่าแรงดันสูงเซลล์แสดงอิทธิพลของทรานสิชันคาปาซิแตนซ์

ทั้งนี้เพราะว่า ที่ช่วงค่าแรงดันต่ำเซลล์มีกระแสสูงในภาวะสว่าง แต่ในช่วงแรงดันสูงเซลล์มีค่ากระแสน้อยลง ซึ่งต่างกับผลทดสอบในภาวะมืดและในรายงานก่อนหน้านี้ และ แม้ว่าจะมีผลการศึกษามิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะสว่างจำนวนมากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แต่ก็ยังไม่พบผลการศึกษาลักษณะคาปาซิแตนซ์ – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนในภาวะสว่าง [88-92]

เพื่อทดสอบอิทธิพลของคาปาซิแตนซ์ทั้งสองชนิดในเซลล์แสงอาทิตย์ และสมบัติของรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – แรงดันที่วัดได้ จึงถูกแสดงด้วย “ม็อต – ชอตกี พล็อต” (Mott-Schottky plot) ซึ่งแสดงลักษณะส่วนกลับของคาปาซิแตนซ์ยกกำลังสอง เทียบกับ ค่าแรงดัน ($1/C^2$ vs V) ดังรูปที่ 4.37 พบว่า ความชันของ “ม็อต – ชอตกี พล็อต” แบ่งออกเป็นสองช่วง คือช่วงแรงดันต่ำ และช่วงแรงดันสูง ซึ่งได้รับอิทธิพลจากทรานสิชันและดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์ ตามลำดับ ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.37 “ม็อต – ชอตกี พล็อต” (Mott-Schottky Plot) ของเซลล์แสงอาทิตย์

ช่วงแรงดัน 0.3 - 0.5 V เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยว มีความชันของ “ม็อด – ซอตที พล็อต” เป็นค่าลบ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะอิทธิพลของทรานสิชันคาปาซิแตนส์ และสรุปได้ว่า

ก) ในภาวะสว่าง เซลล์ซิลิกอนผลึกเดี่ยว แสดงอิทธิพลจากคิฟิวชันคาปาซิแตนส์ในช่วงแรงดันต่ำ และแสดงอิทธิพลจากทรานสิชันคาปาซิแตนส์ในช่วงแรงดันสูง กลับกันกับผลการทดสอบในภาวะมืด

ข) เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบนี้ มีรอยต่อเป็นแบบเปลี่ยนกระทันหัน (Abrupt junction) กล่าวคือ ความหนาแน่นของอะตอมธาตุเจือเปลี่ยนไปทันทีที่รอยต่อ