บทที่ 5
การวิเคราะห์ต้นทุน และ ความคุ้มค่า

5.1 บทนำ

ต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสมที่ประกอบด้วยชั้น SE และ LBSF ช่วยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตราฐาน วิธีการศึกษานี้จึงเป็นการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนให้สูงมากขึ้น ด้วยการนำเซลล์แสงอาทิตย์และกระบวนการผลิตมาต่อยอดซึ่งการทำชั้น ARC เป็นชั้นป้องกันการดูดกลืนแสงจากกระบวนการผลิตในห้องแลปวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาการผลิตเซลล์ตามกระบวนการมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยเพิ่มส่วนของชั้นฟิล์ม PSG และ BSG ที่ทำการสกัดชั้นความหนาและเปิดช่องด้วยสารเคมี จะทำให้ เซลล์จะให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้น จากเซลล์มาตรฐาน จากการเก็บผลและวิเคราะห์ในบทที่ 4 จะได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ต้นทุน และความคุ้มค่า เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนานำไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม

5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า

ต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์มาจากส่วนหลัก ๆ ที่ประกอบด้วยค่าเครื่องจักร ค่าบารุงรักษาเครื่องจักร ค่าเสื่อมสภาพ ค่าวัตถุดิบ ค่าจ้างพนักงาน ค่าวัสดุสิ้นเปลือง ค่าสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้อง ค่าจัดเก็บและการบรรจุ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.1 ในงานศึกษานี้ได้นำข้อมูลต้นทุนการผลิตจากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) มาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการผลิตเซลล์โครงสร้างต่างๆด้วยวิธีต้นทุนต่ำจากการพิมพ์ลายและประทับลาย แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแผ่นเซลล์ผลึกซิลิคอนมีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 57% ของต้นทุนการผลิตเซลล์ทั้งหมด และมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 3% ข้อมูลทั้งหมดได้จากบริษัทโซลาร์ตรอนจากัด (มหาชน) ในการศึกษานี้ได้ตั้ง ได้ประมาณค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่มีส่วนประกอบของโครงสร้างที่สร้างขึ้นโดยให้มีค่าสูงกว่าเซลล์มาตรฐานประมาณ 0.63 % เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของเซลล์มาตรฐานในอุตสาหกรรมกับ โครงสร้างที่สร้างในห้องแลป วิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุระนารี โดย เซลล์ที่สร้างจะสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์โครงสร้างมาตรฐาน เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบและนำไปสู่การผลิตในอุตสาหกรรมให้มีความคุ้มค่าต่อไป

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์

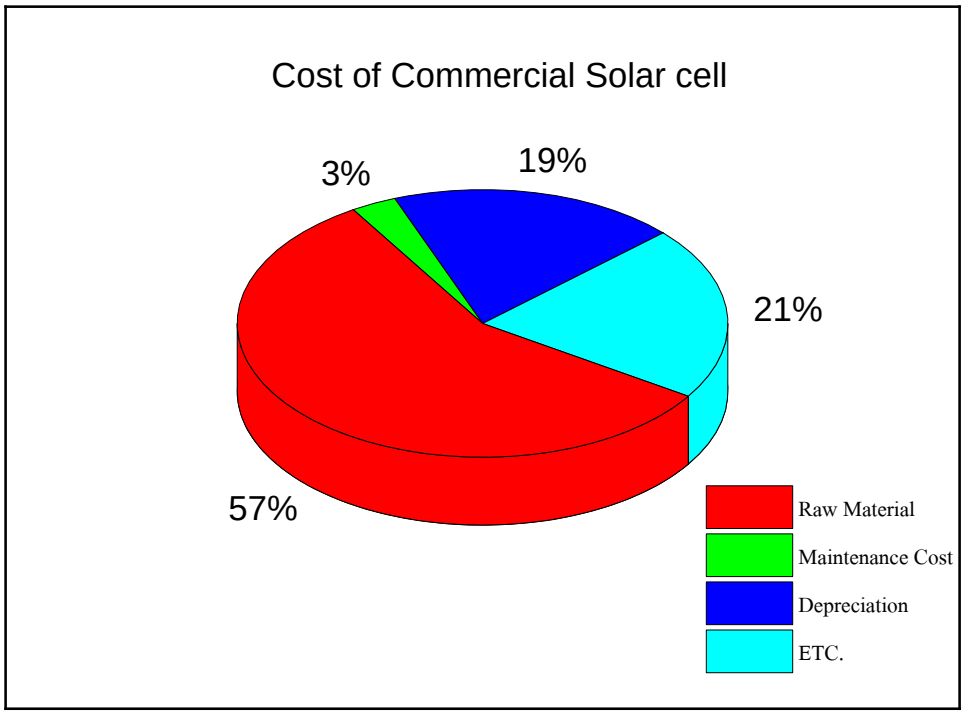
ค่าวัตถุดิบ	แผ่นฐาน	แผ่นซิลิคอนหลายผลึก ชนิด p-Si
	สารเคมี	Hydrofluoric acid (HF)
		Nitric acid (HNO_3)
		Hydrochloric acid (HCl)
		Potassium Hydroxide (KOH)
	ก๊าส	Silane (SiH_4)
		Ammonia (NH_3)
		Phosphorus oxychloride ($POCl_3$)
		Oxygen (O_2)
	วัตถุดิบทำขั้วโลหะ	Silver (Ag) Paste
		Aluminium (Al) Paste
	ไหม Screen และ ยาง Squeegee	
ค่าบำรุงรักษา และ ตรวจเช็คอุปกรณ์	เครื่องจักรมาตรฐาน	ค่าซ่อมบำรุง รางสายพานขนส่งชิ้นงาน, มอร์เตอร์ , หลอดไฟ IR , ท่อส่งแก๊ส , ท่อสารเคมี และชิ้นส่วนที่มีเสื่อมสภาพอื่นๆ
ค่าเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรมาตรฐาน	ค่าเสื่อมสภาพ อุปกรณ์ การผลิต = $\frac{\text{ราคาต้นทุนการติดตั้ง} - \text{ราคาซาก}}{\text{อายุการใช้งานของเครื่องจักร}}$
ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ	ค่าจ้างบุคลากร ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน ค่าน้ำ อื่นๆ	

จากตารางที่ 5.1 แสดงส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ โดยมีอยู่ 4 ส่วนประกอบสำคัญ คือ ค่าวัตถุดิบ ค่าซ่อมบำรุง ค่าเสื่อมสภาพอุปกรณ์ และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ และแสดงองค์ประกอบแยกย่อยไว้ในตาราง เพื่อให้เห็นรายละเอียดต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราห์หาต้นทุนการผลิตต่อชิ้นต่อไป

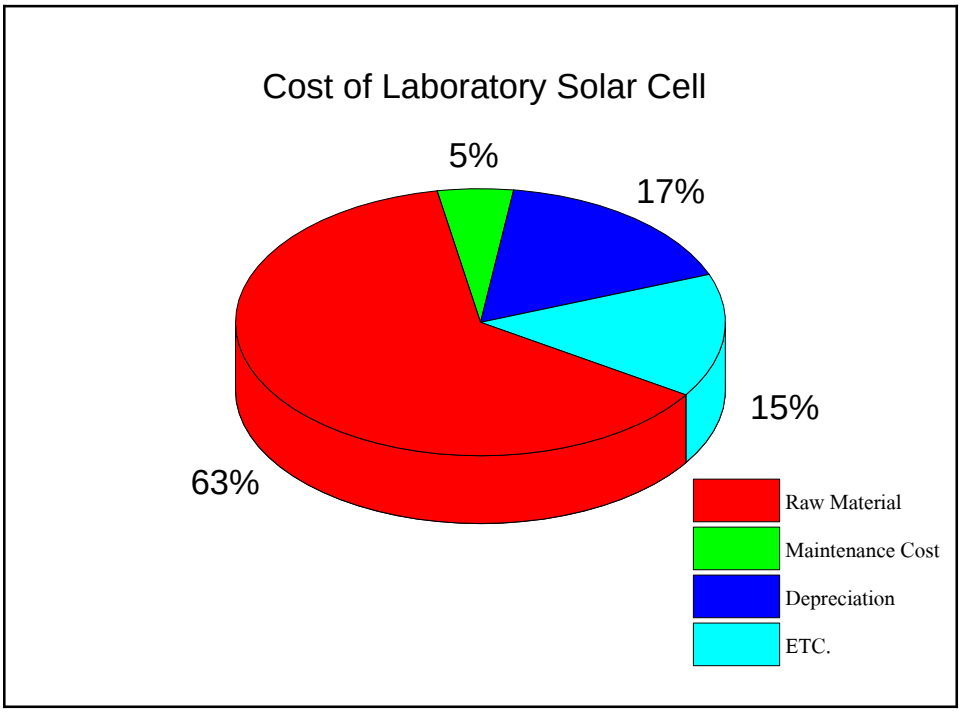
ตารางที่ 5.2 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในแลปวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์

ค่าวัตถุดิบ	แผ่นฐาน	แผ่นซิลิคอนหลายผลึก ชนิด p-Si
	สารเคมี	Hydrofluoric acid (HF)
		Ammonia (NH_4OH)
		Hydrochloric acid (HCl)
		Phosphoric acid (H_3PO_4)
		Tetraethyl orthosilicate (TEOS)
		Ethanol (C_2H_5OH)
	ก๊าส	NITROGEN GRADE INDUSTRIAL 99.99 %
		NITROGEN GRADE PURE 99.995 %
	วัตถุดิบทำขั้วโลหะ	Silver (Ag) Paste
		Aluminium (Al) Paste
	ไหม Screen และ ยาง Squeegee	
ค่าบำรุงรักษา และ ตรวจเช็คอุปกรณ์	เครื่องจักรมาตรฐาน เครื่องจักรประทับลวดลายช่องเปิด	ค่าซ่อมบำรุง รางสายพานขนส่งชิ้นงาน, มอร์เตอร์, หลอดไฟ IR , ท่อส่งแก๊ส , ท่อสารเคมี และชิ้นส่วนที่มีเสื่อมสภาพอื่นๆ
ค่าเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรมาตรฐาน เครื่องจักรประทับลวดลายช่องเปิด	ค่าเสื่อมสภาพ อุปกรณ์ การผลิต = $\frac{\text{ราคาต้นทุนการติดตั้ง} - \text{ราคาซาก}}{\text{อายุการใช้งานของเครื่องจักร}}$
ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต ค่าน้ำ อื่นๆ	

ตารางที่ 5.2 แสดงส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในแลปวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีอยู่ 4 ส่วนประกอบสำคัญ คือ ค่าวัตถุดิบ ค่าซ่อมบำรุง ค่าเสื่อมสภาพอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายอื่นๆ และแสดงองค์ประกอบแยกย่อยไว้ในตาราง เพื่อให้เห็นรายละเอียดต่างๆ ซึ่งมีความแตกต่างกับระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ และนำไปสรุปเป็นอัตราส่วน ต่างๆไว้ใน รูปที่ 5.1 แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์ , ค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักร , ค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักรอยู่ที่ และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยที่จะเห็นสัดส่วนความแตกต่างระหว่าง วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ค่าบำรุงรักษา ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยจะพบว่า สัดส่วนของต้นทุวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ พบว่าวัตถุดิบ มีสัดส่วนสูงสดประมาณ 57 % ของต้นทุนการผลิตทั้งหมดและมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 3 % ค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักรอยู่ที่ 19 % และค่าใช้จ่ายอื่นๆอยู่ที่ 21 %



รูปที่ 5.1 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 5.2 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในแลปวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์

และ ในทางกลับกัน แสดงในรูปที่ 5.2 แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องแลปปฏิบัติการและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี พบว่าวัตถุดิบมี

สัดส่วนสูงสุดประมาณ 63 % ของต้นทุนการผลิตทั้งหมดและมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 5 % ค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักรอยู่ที่ 17 % และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆอยู่ที่ 15 % และจะนำผลตัวนี้ไปหาต้นทุนการผลิต คิดเป็น การผลิตบาท ต่อ 1 ชิ้น และต้นทุนกำลังวัตต์ต่อบาท และ วัตต์ต่อดอลล่าร์สหรัฐ ออกมา และ แสดงใน ตารางที่ 5.3

โดยราคาที่เห็นจะแสดงราคาเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมนั้น โดยจำลองเป็นการผลิต 10 ล้านชิ้นใน 1 ปี และ จัดแจง ออก มาเป็นราคาการผลิต 1 ชิ้น ของโครงสร้างต่างๆ โดย โครงสร้างโรงงานราคาวัตถุดิบตกอยู่ประมาณ 15.03 บาท ต่อการผลิต 1 ชิ้น ส่วนของโครงสร้างใน ห้องปฏิบัติการ ตกชิ้นละ 15.03 บาท ต่อ 1 ชิ้น เช่นเดียวกันแต่มีส่วนที่เพื่อเข้ามาต่อการผลิต เช่น สารเคมี ในกระบวนการผลิตตกเพิ่มเป็น 0.375 บาท โครงสร้าง SE , สารเคมี ในกระบวนการผลิตตกเพิ่มเป็น 0.0754 บาท โครงสร้าง LBSF และ สารเคมี ในกระบวนการผลิตตกเพิ่มเป็น 0.4354 บาทโครงสร้าง SE+LBSF สรุปค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.03 บาทในโครงสร้างมาตรฐาน , ค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.41 บาทในโครงสร้างSEในห้องปฏิบัติการ,ค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.11 บาทในโครงสร้างLBSFในห้องปฏิบัติการ และ ค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.47 บาทในโครงสร้างSE+LBSFในห้องปฏิบัติการ ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรตกราคาบาทต่อชิ้น มีการผลิต 4 โครงสร้างตก 0.78 บาท ในส่วนของโครงสร้างมาตรฐานและ โครงสร้าง SE และตก 0.7805 บาท ในส่วนของโครงสร้างLBSF และ โครงสร้าง SE+LBSF ค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักร ตก 5 บาทต่อ 1 ชิ้น และมีค่าเครื่องประทับลาดลายด้วยสารละลายกรด คิดเป็น 0.002 บาท ต่อ 1 ชิ้น และค่าใช้จ่ายอื่นๆ ในโครงสร้างเชิงพาณิชย์ 5.6 บาท และผลรวมการผลิตของโครงสร้างเชิงพาณิชย์ ตกอยู่ที่ 26.41 บาทต่อชิ้น , โครงสร้าง SE ตกอยู่ที่ 26.79 บาท ต่อ ชิ้น , โครงสร้าง LBSF ตกอยู่ที่ 26.49 บาท ต่อ ชิ้น , โครงสร้าง SE+LBSF ตกอยู่ที่ 26.85 บาท ต่อ ชิ้น และ ราคากำลังผลิตตกบาท ต่อ วัตต์ ของโครงสร้างอุตสาหกรรม เป็น 5.8421 บาท ต่อ วัตต์ และ โครงสร้าง SE 5.7015 บาท ต่อ วัตต์ โครงสร้าง LBSF 5.7377 บาท ต่อ วัตต์ และโครงสร้างผสมผสาน 5.7423 บาท ต่อ วัตต์ และเมื่อแปลงเป็นดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ ของโครงสร้างอุตสาหกรรม เป็น 0.1631 ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ และ โครงสร้าง SE 0.1592 ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ โครงสร้าง LBSF 0.1602 บาท ต่อ วัตต์ และโครงสร้างผสมผสาน 0.1603 ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ ซึ่งโดยการใช้กระบวนการสารเคมีที่ใช้ในการผลิตในห้องวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มีแนวโน้มที่จะลดราคาการผลิตลดลงโดยให้ผลจากค่าประสิทธิภาพที่มากขึ้น

โดยการคิดต้นทุนของห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีราคาที่ถูกกว่าเนื่องมาจาก โรงงาน ได้มีการใช้วัตถุดิบ ที่มากกว่า และเซลล์มาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการเป็นการผลิตได้สั่งซื้อโครงสร้างสำเร็จรูป p/n ไม่ได้มีการสร้างชั้นรับแสง n เอง เนื่องมาจากสามารถควบคุมคุณภาพการผลิตได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามการผลิตด้วยการใช้สารเคมี จะแสดงให้เห็นว่า ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นนั้น มีราคาเพิ่มขึ้นไม่มาก ทั้งยังเป็นการปรับหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตได้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคตได้

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อุตสหกรรม กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่ผลิตในแลปวิจัยแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัย

แหล่งผลิต		**อุตสาหกรรม**	**แลปวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์**		
โครงสร้าง		STANDARD CELL	SE CELL	LBSF CELL	SE + LBSF CELL
ประสิทธิภาพ	(%)	18.4	19.12	18.79	19.03
ขนาดพื้นที่รับแสง	ตร.ซม.	15.675*15.675			
จำนวนคาดการณ์การผลิต ใน 1 ปี	ชิ้น	10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000
ค่าวัตถุดิบ					
วัตถุดิบมาตราฐาน					
Wafers	บาท	66,000,000	66,000,000	66,000,000	66,000,000
Chemicals	บาท	15,000,000	15,000,000	15,000,000	15,000,000
Gas	บาท	30,000,000	30,000,000	30,000,000	30,000,000
Pastes	บาท	34,720,165	34,720,165	34,720,165	34,720,165
Screen and Squeegee	บาท	4,600,000	4,600,000	4,600,000	4,600,000
		150,320,165	150,320,165	150,320,165	150,320,165
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	15.03	15.03	15.03	15.03
วัตถุดิบที่เพิ่มเข้ามา					
Additional chemicals	บาท	-	3,600,000.00	600,000.00	4,200,000.00
Flash foam	บาท	-	-	24,000.00	24,000.00
Spin coater	บาท	-	130,000.00	130,000.00	130,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	-	0.373	0.0754	0.4354

ตารางที่5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อุตสหกรรม กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่ผลิตในแลปวิจัยแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัย (ต่อ)

ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร					
เครื่องจักรมาตราฐาน	บาท	7,800,000.00	7,800,000.00	7,800,000.00	7,800,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	0.78	0.78	0.78	0.78
เครื่องจักรประทับลาย	บาท	-	-	5,000.00	5,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท			0.0005	0.0005
ค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักร					
เครื่องจักรมาตราฐาน	บาท	50,000,000.00	50,000,000.00	50,000,000.00	50,000,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	5	5	5	5
เครื่องจักรประทับลาย	บาท	-	-	20,000.00	20,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	-	-	0.002	0.002
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ					
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	บาท	56,000,000.00	56,000,000.00	56,000,000.00	56,000,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	5.6	5.6	5.6	5.6
ผลรวมราคาทั้งหมด	บาท	264,120,165.43	267,850,165.43	264,899,165.43	268,499,165.43
ผลรวมราคาต่อชิ้น	บาท	26.41	26.79	26.49	26.85
แปลงราคา เป็นบาท ต่อ วัตต์ และ ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์					
กำลังวัตต์ ต่อชิ้น	Watt per pirce	4.52	4.70	4.62	4.68
กำลังวัตต์ทั้งหมด	Watt	45,209,835	46,978,916	46,168,087	46,757,780
ราคาบาท ต่อวัตต์	baht per watt	5.8421	5.7015	5.7377	5.7423

ตารางที่5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อุตสหกรรม กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่ผลิตในแลปวิจัยแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัย (ต่อ)					
แปลงราคา เป็นบาท/วัตต์ และ ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ (ต่อ)					
ราคาดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์	USD per watt	0.1631	0.1592	0.1602	0.1603

5.3 สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการใช้ PSG และ เพื่อเป็นชั้นพาเซเวชั่น และชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (ARC) และการใช้ชั้น BSG ที่สกัดพื้นผิวและเปิดช่องด้านหลังบางบริเวณ LBSF ที่ด้านหลัง โดยทั้งสองโครงสร้างที่กล่าวมามีการเพิ่มประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างมาตราฐานและมีต้นทุนประมาณ 0.1603 ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ จากการพิจารณาความคุ้มค่าได้คาดการณ์ว่าเมื่อนำเซลล์ไปผลิตในกระบวนการมาตรฐานในระดับอุตสาหกรรมจะมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงโดยการใช้สารเคมีเป็นหลัก เข้ามาในกระบวนการผลิตแทนที่การใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายของโรงงานอุตสาหกรรมได้