

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์สำหรับการผลิตชิ้นส่วน
อิเล็กทรอนิกส์

THE DESIGN OF ELECTROSTATIC DISSIPATION AND GROUNDING FOR
ELECTRONIC MANUFACTURING



T128574

อนุสรณ์ จักรแก้ว
ANUSORN CHAKKAEW

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....128574.....
วัน เดือน ปี.....5 11 2556.....

ที่ en
b. 12552963
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555
KMITL-2012-EN-D-018-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาในการดำเนินการวิจัยจาก อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณที่ดีแก่ข้าพเจ้า ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณคุณแม่ สำหรับกำลังใจ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดต่อและประสานงานตลอดเวลาที่ทำการศึกษาอยู่

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณสุรชนี ชูสง่า ที่เป็นเสมือนคู่คิดและกำเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการศัพท์เทคนิคและคำย่อ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.1.1 ปัญหาจากไฟฟ้าสถิตต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์.....	1
1.1.2 การป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิต.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	8
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	9
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.5 รายละเอียดเนื้อหา.....	9
บทที่ 2 ไฟฟ้าสถิตและการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตในงานอิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.1 ไฟฟ้าสถิตและความสามารถในการเกิดประจุจากการสัมผัส.....	10
2.2 ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ.....	13
2.3 การเกิดไฟฟ้าสถิตบนร่างกายจากการเคลื่อนไหว.....	15
2.4 ความเสียหายของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และแบบจำลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิต.....	17
2.5 ความไวของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่อระดับไฟฟ้าสถิต.....	20
บทที่ 3 การควบคุมไฟฟ้าสถิตโดยการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตลงสู่ระบบกราวด์.....	23
3.1 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายด้วยสายรัดข้อมือหรือ Wrist Strap.....	23
3.2 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายผ่านสายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง.....	25
3.2.1 ชนิดตรวจสอบด้วยค่าความจุหรืออิมพีแดนซ์.....	25
3.2.2 ชนิดตรวจสอบด้วยค่าความต้านทาน.....	26
3.2.3 ชนิดตรวจสอบด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า.....	26
3.3 ถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายด้วยพื้นและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิต.....	28
3.3.1 ชนิดและการเลือกใช้พื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต.....	29
3.3.2 การทดสอบพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตและรองเท้า.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตของโต๊ะทำงานหรือ Workstation.....	30
3.5 ถ่ายเทไฟฟ้าสถิตของเครื่องจักรหรือเครื่องมือด้วยระบบกราวด์.....	33
3.6 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านอุปกรณ์จับถือหรือคีมหยิบชิ้นงาน.....	34
บทที่ 4 การออกแบบการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์.....	36
4.1 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมและการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกาย.....	36
4.1.1 ปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายที่ผิวหนังแห้งหรือระบบ.....	37
สายรัดข้อมือขำรูด	
4.1.2 ปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะเดินเมื่อใช้เฉพาะรองเท้า.....	38
และพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต	
4.1.3 ปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิด.....	39
ตรวจสอบแบบต่อเนื่อง	
4.2 การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานขนาดเล็กผ่านพื้นผิวดิสซิเปทีฟ.....	39
4.3 การตรวจสอบระบบกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือ.....	41
4.4 การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านอุปกรณ์จับถือชิ้นงาน.....	43
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	45
5.1 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือ.....	45
5.2 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือแบบ.....	46
ตรวจวัดตลอดเวลา	
5.3 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่ใช้รองเท้าและ.....	47
พื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต	
5.4 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานขนาดเล็กผ่านพื้นผิวดิสซิเปทีฟ.....	50
5.5 การศึกษาการตรวจวัดความต้านทานของระบบกราวด์ของเครื่องจักร.....	51
หรือเครื่องมือ	
5.6 การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านคีมจับถือหรือ tweezers.....	53
5.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	54
5.7.1 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือแบบ.....	54
ต่อลงกราวด์โดยตรง	
5.7.2 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือแบบ.....	55
ตรวจวัดตลอดเวลา	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.7.3 ไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการเสียดสีของแท่งและพื้นผิวของไฟฟ้าสถิต.....	56
ชนิดต่างๆ	
5.7.4 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานขนาดเล็กผ่านพื้นผิววัสดุซีเปทีฟ.....	56
5.7.5 การศึกษาการตรวจวัดความต้านทานของระบบกราวด์ของเครื่องจักร.....	57
หรือเครื่องมือ	
5.7.6 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านคีมจับถั้วหรือ tweezers.....	58
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	67
ภาคผนวก ค.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	90



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางการเกิดไฟฟ้าสถิต ตาม Triboelectric Series ของวัสดุ.....	11
2.2 ย่านความต้านทานของวัสดุพื้นผิวเช่นแผ่นปุโด้และพื้น.....	14
2.3 ย่านความต้านทานของวัสดุใช้ในงานบรรจุภัณฑ์.....	15
2.4 การเปลี่ยนแปลงความจุของร่างกายที่อิริยาบถต่าง ๆ.....	17
2.5 ตัวอย่างความไวของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่อระดับไฟฟ้าสถิต.....	21
2.6 แสดงระดับความไวต่อไฟฟ้าสถิตตามแบบจำลองการดิสชาร์จร่างกาย หรือ HBM.....	22
2.7 แสดงระดับความไวต่อไฟฟ้าสถิตตามแบบจำลองการดิสชาร์จจากเครื่องจักร หรือ MM.....	22
2.5 แสดงระดับความไวต่อไฟฟ้าสถิตตามแบบจำลองการดิสชาร์จจากอุปกรณ์ หรือ CDM.....	22
3.1 ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร่างกาย.....	24
4.1 ขนาดของแท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กถึงเพื่อจำลองชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก.....	41
5.1 รายละเอียดของพื้นและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการทดลอง.....	48
5.2 รายละเอียดของพนักงานที่ร่วมทดลอง.....	49
5.3 ขนาดของแท่งอิเล็กโทรด และค่าความต้านทานของพื้นผิว 2 ชนิด ที่วัดจากขนาด ของแท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดและน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไป	50
5.4 ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน 10 โอห์ม ที่มีกระแส 9 มิลลิแอมป์ไหลผ่าน.....	51
โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์และอิมพีแดนซ์มิเตอร์ที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การสะสมของฝุ่นที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากไฟฟ้าสถิตบนชิ้นงานและ.....3 ทำความเข้าใจมากขึ้น	
1.2 ปัญหาจากแรงดันสูงเกินของการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหาย.....3 หรือทำงานผิดปกติ ถ่ายจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	
1.3 แนวโน้มความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของซีมอสจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากร่างกาย.....4	
1.4 แนวโน้มความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของซีมอสจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากเครื่องจักร.....4	
1.5 แนวโน้มความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของซีมอสจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากชิ้นงาน.....4 หรือ Charged Device Model	
1.6 ตัวอย่างการควบคุมไฟฟ้าสถิตของโต๊ะทำงานโดยการถ่ายเทประจุที่เกิดขึ้นลงกราวด์.....6 ผ่านทางพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์	
1.7 (ก) การป้องกันการรบกวนของสนามไฟฟ้าและ (ข) วัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกัน.....6 การรบกวนของสนามไฟฟ้า	
1.8 การควบคุมไฟฟ้าสถิตโดยการสลายประจุและทำให้วัสดุมีสภาพเป็นกลาง.....7 ทางไฟฟ้าโดยใช้พัดลม Ionized Air Blower	
1.9 คุณสมบัติของพัดลม Ionizer โดยการวัดเวลาในการสลายประจุและความเท่ากัน.....7 ของประจุบวกและประจุลบ	
1.10 (ก) การควบคุมไฟฟ้าสถิตของร่างกายโดยการใช้สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์.....8 และ (ข) การควบคุมไฟฟ้าสถิตของร่างกายโดยการใช้สายรัดรองเท้าหรือรองเท้าตัวนำ และพื้น	
2.1 การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัส (ก) และแยกออกจากกันของวัสดุ (ข).....10	
2.2 ลักษณะการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต.....12	
2.3 การแลกเปลี่ยนประจุเนื่องจาก Work Function ของวัสดุที่แตกต่างกัน.....12	
2.4 ลักษณะผิวสัมผัสของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของปริมาณไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น.....13	
2.5 ลักษณะการเกิดไฟฟ้าสถิตบนร่างกายจากการสัมผัสของรองเท้าและพื้น.....15 ขณะร่างกายเคลื่อนไหว	
2.6 ตัวอย่างปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายขณะร่างกายเคลื่อนไหว.....16	
2.7 แบบจำลองที่แสดงความจุของร่างกายที่เปลี่ยนแปลงไปตามอิริยาบถ.....16	
2.8 ลักษณะการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากร่างกายไปยังชิ้นงาน (ก) และวงจรสมมูลย์.....18 ที่ใช้ทดสอบ (ข)	
2.9 ลักษณะจำเพาะของรูปคลื่นจากแบบจำลองการดิสชาร์จของไฟฟ้าสถิตจากร่างกาย.....19 ไปยังชิ้นงาน	

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.10 ลักษณะการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากเครื่องมือเครื่องจักรไปยังชิ้นงาน (ก).....	19
และวงจรสมมุทธ์ที่ใช้ทดสอบ (ข)	
2.11 ลักษณะจำเพาะของรูปคลื่นจากแบบจำลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากเครื่องมือ.....	19
ไปยังชิ้นงาน	
2.12 ลักษณะการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานที่มีประจุไปยังวัตถุอื่น (ก) และวงจร.....	20
สมมุทธ์ที่ใช้ทดสอบ (ข)	
3.1 สายรัดข้อมือ (ก) และตัวอย่างการทดสอบสายรัดข้อมือพร้อมสายต่อลงกราวด์ (ข).....	25
3.2 สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่อง.....	26
ชนิดสายตัวนำเดี่ยว และตรวจสอบด้วยค่าความจุ	
3.3 สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่อง.....	26
ชนิดสองสาย และตรวจสอบด้วยค่าความต้านทาน	
3.4 สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่อง.....	27
ชนิดสายตัวนำคู่ และตรวจสอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า	
3.5 ตัวอย่างคุณสมบัติเพิ่มเติมของสายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ชนิดที่ทำงานร่วมกับ.....	27
วงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่องโดยสามารถวัดการต่อลงกราวด์ของโต๊ะทำงานแบบตลอดเวลา	
3.6 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายโดยการใช้อุปกรณ์ร่วมกัพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต.....	28
3.7 การวัดความต้านทานของรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิต.....	30
3.8 การวัดความต้านทานรวมของร่างกายร่วมกับรองเท้าและพื้น.....	30
3.9 การวัดความปริมาณไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากรองเท้าและพื้น.....	30
3.10 การควบคุมไฟฟ้าสถิตของโต๊ะทำงานด้วยพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์.....	31
3.11 การวัดความต้านทานเพื่อตรวจการลงกราวด์ของพื้น (ก) และแท่งอิเล็กโทรด.....	31
มาตรฐานที่ใช้ในการวัด (ข) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หน้า 2.27 กิโลกรัม	
3.12 การวัดระบบกราวด์รูดขึ้นด้วยแท่งอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	32
3.13 การวัดระบบกราวด์ของเก้าอี้ด้วยแท่งอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	32
3.14 วัดระบบความต้านทานของเสื้อผ้าด้วยแท่งอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	33
3.15 ความซับซ้อนของเครื่องจักรทำให้การต่อกราวด์และตรวจสอบระบบกราวด์ของชิ้นส่วน.....	34
ต่างๆ เป็นไปด้วยความยุ่งยาก โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ไปหยิบจับชิ้นงาน	
3.16 การตรวจสอบระบบกราวด์โดยทั่วไปของเครื่องจักรหรือเครื่องมือโดยการวัด.....	34
ความต้านทานด้วย Digital Multimeter	
3.17 การที่มีได้ใช้นิ้วมือในการหยิบจับชิ้นงานโดยตรง แต่ใช้อุปกรณ์จับถือหรือคีมหยิบ.....	35
ขนาดเล็กในการหยิบจับชิ้นงาน	

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความต้านของสายรัดข้อมือที่เพิ่มขึ้นซึ่งจำลองผิวหนังแห้งหรือระบบสายรัดข้อมือเริ่มชำรุด.....	37
4.2 แสดงตัวอย่างการกำหนดออกแบบค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ของระบบ.....	37
สายรัดข้อมือ ที่ขึ้นงานมีความไวต่อไฟฟ้าสถิตที่ 40 โวลต์ ค่าความต้านทานร่างกาย ที่สูงสุด ควรตั้งไว้ที่ 10 เมกโอห์ม	
4.3 ตัวอย่างการตั้งค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ของระบบสายรัดข้อมือ.....	38
ที่ 10 เมกโอห์ม บนเครื่องทดสอบสายรัดข้อมือ หรือ wrist strap tester ตามการออกแบบในรูปที่ 4.2	
4.4 การวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าสถิตบนร่างกายอันเนื่องมาจากการเคลื่อนไหว.....	38
4.5 การวัดไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง.....	39
4.6 การวัดความต้านทานของพื้นผิวตีสซิเปที่ที่วัดจากขนาดของแท่งอิเล็กโทรด.....	40
ที่มีขนาดเล็กลงเพื่อจำลองชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก	
4.7 พารามิเตอร์ของการต่อกราวด์ที่เกิดขึ้นจริงจากระบบสายและกระแสที่ไหล.....	42
ในระบบกราวด์	
4.8 การวัดความต้านทานระบบกราวด์และกระแสที่ไหลในระบบกราวด์.....	42
4.9 ความต้านทานที่วัดได้จากคลาดเคลื่อนเนื่องจากกระแสที่ไหลในระบบกราวด์.....	42
การวัดกระแสที่ถูกดิสชาร์จ ผ่านทางหม้อแปลงกระแสขนาดเล็ก รุ่น CT-6	
4.10 การตรวจสอบการต่อลงกราวด์แบบตลอดเวลา ของเครื่องจักรที่ต้องการ.....	43
การควบคุมไฟฟ้าสถิตเป็นพิเศษ	
4.11 การดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของขึ้นงาน.....	43
อิเล็กทรอนิกส์	
4.12 การวัดกระแสที่ถูกดิสชาร์จจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของขึ้นงาน.....	44
อิเล็กทรอนิกส์ ผ่านทางหม้อแปลงกระแสขนาดเล็ก รุ่น CT-6	
5.1 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือ ที่ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป.....	45
5.2 แรงดันตกคร่อมที่ปลายสายรัดข้อมือขณะยังไม่ได้สวมใส่ และแรงดันที่ปลายนิ้ว.....	46
พนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา ชนิดที่ 1	
5.3 แรงดันตกคร่อมที่ปลายสายรัดข้อมือขณะยังไม่ได้สวมใส่ และแรงดันที่ปลายนิ้ว.....	47
พนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา ชนิดที่ 2	
5.4 ความต้านทานของพื้นตัวอย่างทั้ง 8 ชนิด.....	49
5.5 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่ใส่รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต.....	49
5.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานของพื้นผิว 2 ชนิด ที่วัดจากขนาดของ.....	51
แท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไป	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 ตัวอย่างการออกแบบการตรวจสอบการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา.....	52
ที่ใช้แรงดันในการวัดสูงสุดที่ 400 มิลลิโวลต์	
5.8 ตัวอย่างการออกแบบการตรวจสอบการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา.....	53
ที่ใช้แรงดันในการวัดสูงสุดเพียง 70 มิลลิโวลต์ ที่แรงดันในการวัดไม่เป็นอันตราย ต่อชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักร	
5.9 (ก) การทดลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจาก HBM Discharge Simulator ผ่าน.....	53
tweezers และ(ข) จากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์	
5.10 ลักษณะรูปคลื่นจากการทดลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจาก HBM Discharge.....	54
Simulator (ก) และจากร่างกายผ่านทาง tweezers (ข) ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์	
5.11 จากผลการทดลอง ถ้าชิ้นงานมีความไวต่อไฟฟ้าสถิตที่ 10 โวลต์ ความต้านทาน.....	54
ร่างกายที่สูงสุดที่ยอมรับได้คือ 7 เมกโอห์ม	
5.12 แสดงการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือที่แตกต่างกัน 2 กรณี.....	57
5.13 ลักษณะรูปคลื่นของการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากพนักงานที่หยิบชิ้นงานด้วย.....	59
tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีลักษณะเป็น machine model	

รายการศัพท์เทคนิคและคำย่อ

ESD	Electrostatic Discharge
Static Charge on Personnel	ไฟฟ้าสถิตบนร่างกาย
Static Control Footwear	รองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิต
Static Control Surface	พื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิต
Wrist Strap	สายรัดข้อมือที่ควบคุมไฟฟ้าสถิต
Conductive	วัสดุประเภทตัวนำ
Dissipative	วัสดุประเภทดิสซิเปทีฟ
Insulative	วัสดุประเภทฉนวน
Triboelectric Charge	การเกิดไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัส
Antistatic	วัสดุที่เป็น Low Triboelectric Charge
HBM	Human Body Model
CDM	Charged Device Model
MM	Machine Model
IC	Integrated Circuit
PCB	Printed Circuit Board
EOS	Electrical Overstress

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

1.1.1 ปัญหาจากไฟฟ้าสถิตต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

ไฟฟ้าสถิตหรือ static electricity หรือ electrostatics คือพลังงานที่เกิดจากการสัมผัสและเสียดสีของวัตถุ ไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น การหวีผม การเคลื่อนไหวร่างกายบนเก้าอี้ และการเดิน การดึงเทปกาวออกจากม้วน หรือการบรรจุหรือดึงชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์หรือแผงวงจรรอบจากบรรจุภัณฑ์ จากตัวอย่างการเกิดไฟฟ้าสถิตดังกล่าว การถ่ายเทของประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดที่มีศักย์ต่ำกว่าอย่างรวดเร็ว ถูกเรียกว่า การคายประจุไฟฟ้าสถิต หรือการดิสชาร์จของไฟฟ้าสถิต หรือ Electrostatic Discharge (ESD)

ไฟฟ้าสถิตได้เริ่มเข้ามาเป็นปัญหาของอุตสาหกรรมตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1400 โดยชาวยุโรปและชาวคาริบเบียนได้เริ่มมีการควบคุมการเกิดประกายไฟจากการถ่ายเทของไฟฟ้าสถิตในห้องเก็บสารเคมีอันตราย ช่วง ค.ศ. 1860 โรงงานกระดาษได้ใช้วิธีการต่อลงกราวด์เพื่อลดประจุที่เกิดจากม้วนกระดาษขนาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ในช่วง ค.ศ. 1950 กองทัพเรือของประเทศสหรัฐอเมริกาได้เริ่มควบคุมไฟฟ้าสถิตเพื่อลดการรบกวนต่อระบบอุปกรณ์นำร่อง ในช่วง ค.ศ. 1960 ถึง ค.ศ. 1970 เป็นช่วงที่งานด้านอิเล็กทรอนิกส์มีการเจริญเติบโตสูงมาก ทำให้ทั้งการทหารและอุตสาหกรรมต้องมีการควบคุมไฟฟ้าสถิตอย่างจริงจัง ในช่วง ค.ศ. 1978 ตัวแทนของกองทัพและตัวแทนจากภาคอุตสาหกรรมได้เริ่มก่อตั้งกลุ่มเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต และได้ริเริ่มการจัดการสัมมนาอย่างเป็นทางการครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1979 และมีการจัดตั้งสมาคมไฟฟ้าสถิต หรือ Electrostatic Discharge Association ที่ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1982 ที่มีการจัดประชุมสัมมนาเพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ การอบรมเชิงปฏิบัติการ การพัฒนาบุคลากร และการกำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมด้านไฟฟ้าสถิตตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมามาจนถึงปัจจุบัน

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมา กล่าวได้ว่า เป็นช่วงสิบปีของระบบคุณภาพของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การแข่งขันทำให้ผู้ผลิตจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณภาพมากขึ้น มีการนำระบบคุณภาพต่าง ๆ เข้ามาใช้ ไม่ว่าจะเป็นระบบ ISO9000, QS9000, TS16949 และ Six Sigma และพื้นที่ที่ต้องการพัฒนาคุณภาพในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ก็จะมีเรื่องของควบคุมไฟฟ้าสถิตเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งอยู่เสมอ โดยเฉพาะระบบคุณภาพในงานด้านการควบคุมไฟฟ้าสถิตตามมาตรฐาน ESD S20.20 ที่เริ่มใช้งานในปี ค.ศ. 1999 ซึ่งเป็นระบบคุณภาพและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมไฟฟ้าสถิตโดยเฉพาะ

ในปัจจุบัน ด้วยความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่วงจรรวมมีความหนาแน่นสูงขึ้น และมีขนาดที่เล็กลง ยิ่งทำให้วงจรรวมนั้นมีความไวและมีโอกาสที่จะเสียหายจากไฟฟ้าสถิตได้ง่ายยิ่งขึ้น จึงทำให้การป้องกันปัญหาของไฟฟ้าสถิตต่อชิ้นส่วนที่มีความไวต่อไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Sensitive Devices : ESDs) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง มีความสำคัญมากยิ่งขึ้น

อาทิเช่น การผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทวงจรรวม (Integrated Circuit), ผลิตภัณฑ์เก็บข้อมูล (Storage Devices) ทั้งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive) และหัวอ่าน-เขียน (Read - Write Head) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การวางระบบควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสมกับความไวต่อไฟฟ้าสถิตของชิ้นงานและเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า การตัดสินใจเลือกใช้วัสดุควบคุมไฟฟ้าสถิต วิธีการและเครื่องมือทดสอบที่เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิดนั้น บุคลากรที่รับผิดชอบ อาทิเช่น ESD Engineer ต้องทุ่มเทและใช้เวลาเพื่อแก้ไขปัญหาและปรับปรุงงานในด้านนี้ตลอดเวลาและอย่างสม่ำเสมอ

สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น เทคโนโลยีเมมส์ (MEMS : Micro Electro Mechanical System) และเนมส์ (NEMS : Nano Electro Mechanical System) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่รวมระบบกลไกเข้ากับระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมักนิยมผลิตเป็นเซ็นเซอร์ขนาดเล็ก เช่น เซ็นเซอร์วัดแรงกระแทกขนาดเล็กในถุงลมนิรภัย ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตชุดถุงลมนิรภัย มีราคาถูกกว่าการใช้เซ็นเซอร์สมัยก่อนมาก หรือ เซ็นเซอร์วัดแรงดัน เซ็นเซอร์วัดกำลังแม่เหล็ก หรืองานด้านอื่นๆ เช่น ใช้เป็นวาล์วขนาดจิ๋ว กระดาษสะท้อนจิว หรือชุดวิเคราะห์สารเคมี เป็นต้น นอกจากนี้ การประกอบแผงวงจร (Printed Circuit Board Assembly), การประกอบแผงวงจรแสดงผล (Flat Panel Display), การประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมรถยนต์ อาทิเช่น ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมการทำงานของเบรค ABS ระบบควบคุมการทำงานของถุงลมนิรภัย และการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในงานเครื่องมือแพทย์ ก็ต้องพิจารณาถึงความเสียหายที่จะเกิดจากไฟฟ้าสถิต และการควบคุมไฟฟ้าสถิตเช่นเดียวกัน

นอกจากความเสียหายของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว ที่ไฟฟ้าสถิตทำให้เกิดการหลอมละลายของวงจรหรือการเสียหายของฉนวนอันเกิดจากแรงดันสูงเกิน (Electrical Over Stress) แล้ว ไฟฟ้าสถิตยังมีผลกระทบต่อถึงงานที่ต้องการความสะอาดหรือในห้องสะอาด (cleanroom) อาทิเช่น การฉีดขึ้นรูปพลาสติกที่นำมาทำจอแสดงผล ซึ่งชนิดของพลาสติก และลักษณะการฉีดขึ้นรูปอาจทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตสูงมาก ทำให้ดึงฝุ่นละอองและเกิดการสะสมของฝุ่นละอองที่ชิ้นงานมากขึ้น และทำความสะอาดได้ยาก เช่น การประกอบผลึกควอตซ์ (Quartz) ของชิ้นส่วนเพื่อควบคุมความถี่หรือ Quartz Oscillator ที่การสะสมของฝุ่นละอองที่ผลึกควอตซ์ ให้ความถี่ที่ได้จากผลึกนั้น ไม่ถูกต้องตามที่ต้องการ หรือการควบคุมฝุ่นในการผลิตเลนส์แว่นตา ที่ฝุ่นเพียงเล็กน้อยที่ติดอยู่ที่เลนส์ระหว่างการเคลือบผิวเลนส์ ทำให้เลนส์นั้นไม่ผ่านข้อกำหนดคุณภาพ เป็นต้น รวมทั้งงานที่ต้องระวังอันตรายจากการเกิดประกายไฟ เช่น การทำงานกับสารระเหยที่ไวไฟ และการทำงานกับวัตถุระเบิด เป็นต้น

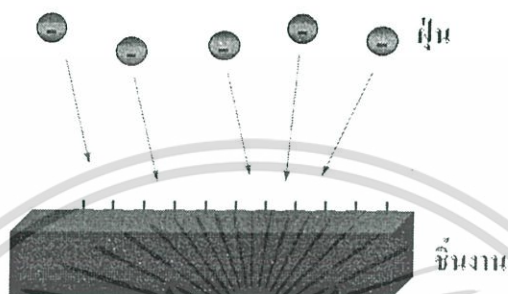
อุตสาหกรรมต่าง ๆ ต้องลงทุนเป็นจำนวนมากในแต่ละปีไปกับความเสียหายและการป้องกันความเสียหายจากไฟฟ้าสถิต เนื่องจากไฟฟ้าสถิตก่อให้เกิดผลกระทบดังนี้ [1]

- การสะสมของฝุ่นที่มากขึ้น (Dust and Lint Attraction) ในกระบวนการผลิต อันเนื่องมาจากไฟฟ้าสถิตบนชิ้นงาน ซึ่งจะดูดอนุภาคของฝุ่นในอากาศมาสะสมที่ชิ้นงานมากกว่าปกติและทำความสะอาดได้ยากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียหายหรือทำงานผิดปกติ (Damage or Malfunction) เนื่องจากจากแรงดันสูงเกินของการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในรูปที่ 1.2 หรืออาจทำ

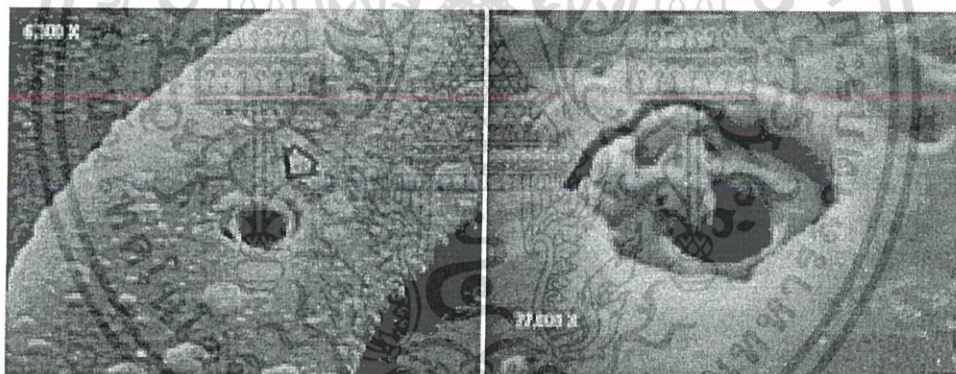
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง และพร้อมที่จะเสียหายที่
ลูกค้ำในขนาดอันใกล้ (Latent Defect)

- ไฟไหม้หรือระเบิด (Fire and Explosion Hazard)
- ไฟฟ้าดูด (Personnel Shock)



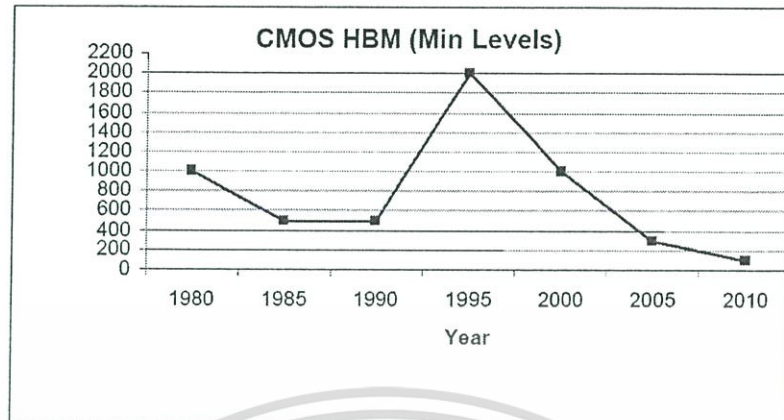
รูปที่ 1.1 การสะสมของฝุ่นที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากไฟฟ้าสถิตบนชิ้นงานและทำความสะอาดได้ยากขึ้น



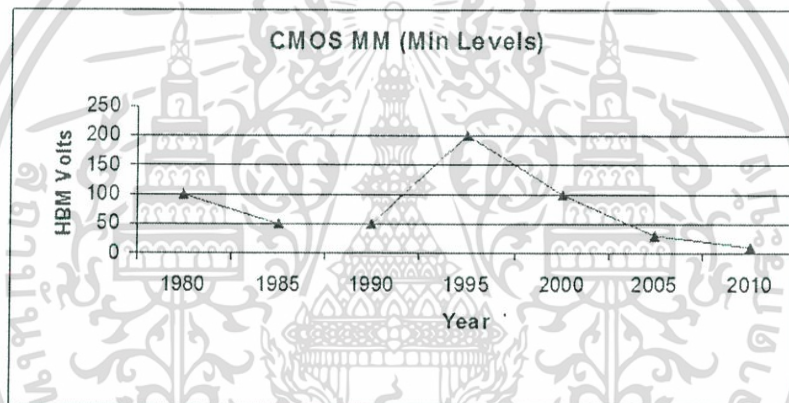
รูปที่ 1.2 ปัญหาจากแรงดันสูงเกินของการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายหรือทำงานผิดปกติ ถ่ายจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ด้วยความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันที่วงจรรวมมีความหนาแน่นสูงขึ้น มีขนาดที่เล็กลงด้วยเทคโนโลยีของซีมอส ก็ยิ่งทำให้วงจรรวมนั้นมีความไวและมีโอกาสที่จะเสียหายจากไฟฟ้าสถิตได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 1.3 รูปที่ 1.4 และ 1.5 ซึ่งแสดงแนวโน้มความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แบบซีมอสจากการดิสชาร์จประจุไฟฟ้าสถิตแบบต่างๆ [2]

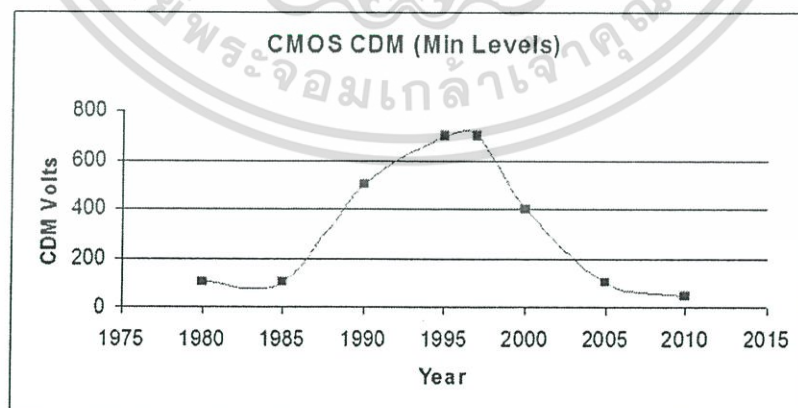
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แนวโน้มความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของซีมอสจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตจากร่างกาย



รูปที่ 1.4 แนวโน้มความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของซีมอสจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตจากเครื่องจักร



รูปที่ 1.5 แนวโน้มความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของซีมอสจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงาน หรือ Charged Device Model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความก้าวหน้าของผลิตภัณฑ์เก็บข้อมูลที่มีการพัฒนาให้ความจุของข้อมูลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มีค่าสูงขึ้น นอกจากการพัฒนาชนิดและสภาพความเป็นแม่เหล็กของแผ่นเก็บข้อมูล (Media) ให้มีประสิทธิภาพและสามารถเก็บข้อมูลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้มากขึ้นแล้ว เทคโนโลยีของหัวอ่าน-เขียนจะต้องมีการพัฒนาให้สามารถอ่านและเขียนข้อมูลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้ละเอียดและแม่นยำยิ่งขึ้นด้วย โดยเฉพาะหัวอ่าน-เขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้เทคโนโลยีแม่เหล็กที่ให้ความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง เช่น Giant Magneto Resistive Head (GMR) เนื่องจากความหนาแน่นของโครงสร้างหัวอ่าน-เขียนที่สูงขึ้นและขนาดที่เล็กลงด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว ทำให้หัวอ่าน-เขียน มีโอกาสที่จะเสียหายจากไฟฟ้าสถิตได้ง่ายยิ่งขึ้น

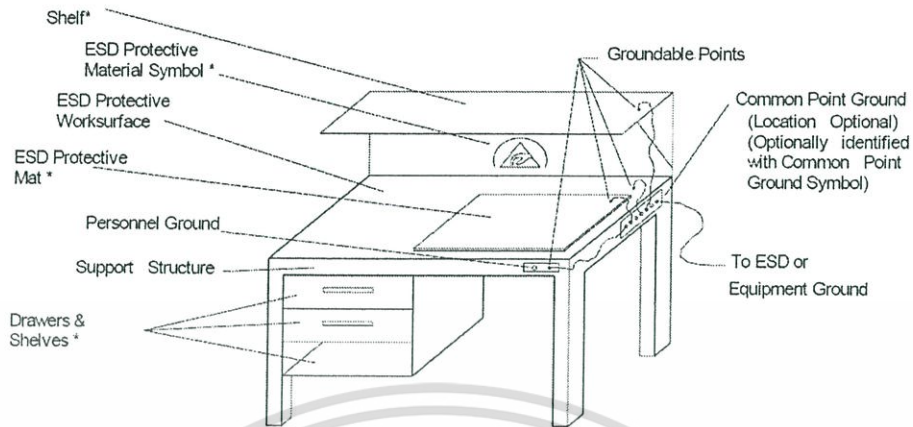
ความเสียหายของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากดิสชาร์จไฟฟ้าสถิต สามารถแสดงออกได้ทั้งความเสียหายแบบทันที (Catastrophic Failure) และความเสียหายแบบยังไม่แสดงความผิดปกติทันที (Latent Failure) ซึ่งความเสียหายนี้ บางครั้งไม่สามารถตรวจสอบพบได้ที่ผู้ผลิตสินค้า จึงไปแสดงปัญหาในลักษณะของการลดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ หรือเสียหายที่ผู้ใช้งานหรือลูกค้าในระยะเวลาอันสั้น ความสูญเสียที่เกิดขึ้น เริ่มจากไดโอดที่มีราคาต่ำ จนกระทั่งถึงวงจรรวมและแผ่นวงจรที่มีราคาแพงมาก รวมถึงราคาที่ต้องซ่อมแซมแก้ไข การส่งของที่อาจล่าช้า ชิ้นส่วนที่ต้องทดแทน และความไม่เชื่อมั่นของลูกค้าในคุณภาพของสินค้า ทำให้ผลรวมของการสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ทำให้เรื่องของการป้องกันและควบคุมไฟฟ้าสถิต จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาและควบคุมอย่างต่อเนื่อง

1.1.2 การป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิต

การป้องกันความเสียหายอันจะเกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิตมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น

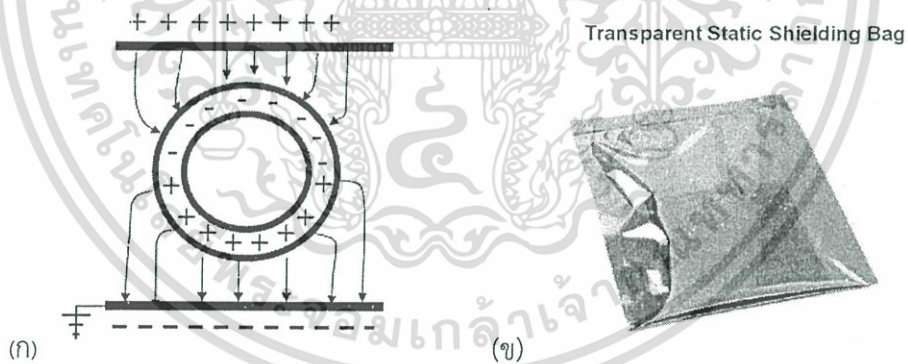
- การออกแบบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตมากขึ้นโดยฝ้ายออกแบบผลิตภัณฑ์
- การลดการเกิดไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสจากวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ในกระบวนการผลิตโดยการเลือกใช้วัสดุที่เกิดไฟฟ้าสถิตต่ำ (Low Static Charge or Antistatic)
- การถ่ายเทประจุที่เกิดขึ้นลงสู่ดิน (Dissipation) เพื่อลดประจุสะสม โดยผ่านทางพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์ ดังรูปที่ 1.6
- การป้องกันการรบกวนของสนามไฟฟ้า (Shielding) โดยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม
- สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนหรือวัสดุที่เป็นตัวนำที่ไม่สามารถต่อลงกราวด์ได้ อาจใช้การแลกเปลี่ยนประจุให้วัสดุนั้นมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutralization) โดยใช้พัดลม Ionized Air Blower ดังรูปที่ 1.8 และคุณสมบัติของพัดลม Ionizer โดยการวัดเวลาในการสลายประจุและความเท่ากันของประจุบวกและประจุลบ แสดงในรูปที่ 1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



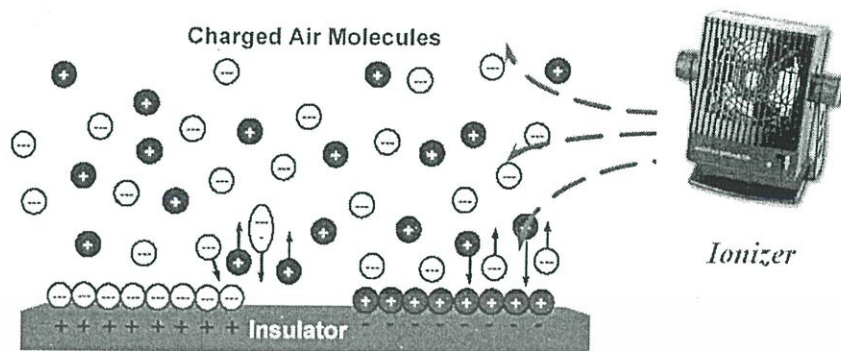
รูปที่ 1.6 ตัวอย่างการควบคุมไฟฟ้าสถิตของโต๊ะทำงานโดยการถ่ายเทประจุที่เกิดขึ้นลงสู่กราวด์ผ่านทางพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์ [3]

บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ป้องกันการรบกวนของสนามไฟฟ้า จะใช้หลักการลูกกรงของฟาราเดย์ (Faraday Cage) โดยใช้สภาพความเป็นตัวนำของวัสดุ อาทิเช่น พลาสติกตัวนำที่ฉีดยึดขึ้นรูปเป็นกล่องบรรจุ หรือการเคลือบโลหะบนแผ่นฟิล์ม (Metalization) ที่นำมาใช้เป็น Static Shielding Bag เพื่อบรรจุชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 1.7

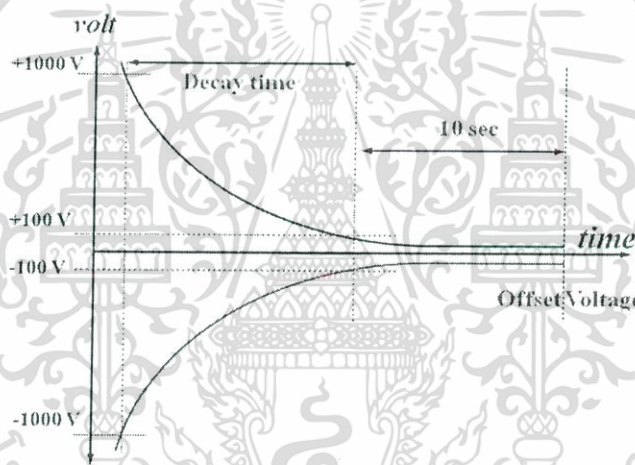


รูปที่ 1.7 (ก) การป้องกันการรบกวนของสนามไฟฟ้าและ (ข) วัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกันการรบกวนของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.8 การควบคุมไฟฟ้าสถิตโดยการสลายประจุและทำให้วัสดุมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยใช้พัดลม Ionized Air Blower



รูปที่ 1.9 คุณสมบัติของพัดลม Ionizer โดยการวัดเวลาในการสลายประจุและความเท่ากันของประจุบวกและประจุลบ

สำหรับไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของร่างกายนั้น วิธีที่สะดวกและสามารถควบคุมปริมาณไฟฟ้าสถิตได้ดี คือการถ่ายเทประจุที่เกิดขึ้นลงสู่กราวด์โดยการใช้สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ร่วมกับพื้นและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่ใช้ถ่ายเทประจุจากร่างกายส่งสู่กราวด์เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 1.10 (ก) และ 1.10 (ข)

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น เทคโนโลยีเมมส์ (MEMS : Micro Electro Mechanical System) และเนมส์ (NEMS : Nano Electro Mechanical System) มีความไวต่อไฟฟ้าสถิตสูงขึ้น การควบคุมฟ้าสถิตตามข้อกำหนดเบื้องต้นของข้อกำหนดของบริษัทที่อ้างอิงมาจากมาตรฐานอุตสาหกรรมทั่วไปอาจไม่พอเพียง งานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและวางระบบควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสมกับความไวต่อไฟฟ้าสถิตของชิ้นงานและเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า เพื่อการเลือกใช้วัสดุควบคุมไฟฟ้าสถิต วิธีการ และเครื่องมือทดสอบที่เหมาะสม

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยการศึกษาการลดปริมาณไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนร่างกายขณะร่างกายเคลื่อนไหว ที่เกิดจากองค์ประกอบจากการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อันได้แก่ ร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน สายรัดข้อมือแบบต่อลงกราวด์โดยตรง และสายรัดข้อมือแบบตรวจสอบตลอดเวลาซึ่งเป็นระบบที่แสดงผลความผิดพลาดของการต่อลงกราวด์ของร่างกายทันทีด้วยไฟแสดงและเสียงเตือน การใช้รองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่สวมใส่และพื้นของโรงงาน โดยนำเสนอวิธีการวัดปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายเป็นปริมาณแรงดัน แสดงวิธีตรวจสอบและควบคุมไฟฟ้าสถิตบนร่างกายที่มีการใช้สายรัดข้อมือ ระบบตรวจวัดสายรัดข้อมือแบบต่อเนื่อง และรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสม การทดสอบพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตที่ใช้สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมากโดยพิจารณาถึงความต้านทานผิวสัมผัสและความสามารถในการถ่ายเทประจุ การต่อกราวด์และการทดสอบระบบกราวด์โดยคำนึงถึงความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันที่ตกคร่อมในระบบกราวด์ที่เกิดจากความต้านทานดังกล่าว

1.5 รายละเอียดเนื้อหา

- บทที่ 1 บทนำ
- บทที่ 2 ไฟฟ้าสถิตและการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตในงานอิเล็กทรอนิกส์
- บทที่ 3 การควบคุมไฟฟ้าสถิตโดยการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตลงสู่ระบบกราวด์
- บทที่ 4 การออกแบบการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์
- บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

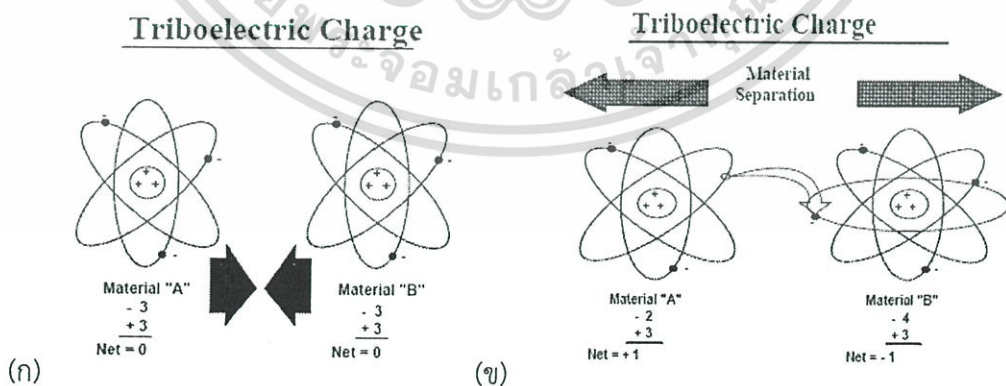
บทที่ 2

ไฟฟ้าสถิตและการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตในงานอิเล็กทรอนิกส์

2.1 ไฟฟ้าสถิตและความสามารถในการเกิดประจุจากการสัมผัส

ไฟฟ้าสถิต คือการที่ปริมาณประจุไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบบนผิววัสดุไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดเมื่อวัตถุทั้ง 2 ชั้นมีประจุต่างชนิดกัน หรือเกิดแรงผลักรันเมื่อวัตถุทั้ง 2 ชั้นมีประจุชนิดเดียวกัน เราสามารถสร้างไฟฟ้าสถิตโดยการนำผิวสัมผัสของวัสดุ 2 ชั้นมาขัดสีกัน พลังงานที่เกิดจากการขัดสีกันจะทำให้ประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุเกิดการแลกเปลี่ยน โดยส่วนใหญ่จะเกิดกับวัสดุประเภทที่ไม่นำไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า ฉนวน ตัวอย่างเช่น ยาง พลาสติก และแก้ว สำหรับวัสดุประเภทที่นำไฟฟ้านั้นโอกาสเกิดปรากฏการณ์ประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุไม่เท่ากันนั้นน้อยกว่าแต่ก็สามารถเกิดขึ้นได้ ไฟฟ้าสถิตเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่คุ้นเคยสำหรับประเทศที่มีอากาศหนาว ในฤดูหนาวสำหรับประเทศเหล่านี้ ความชื้นในอากาศจะต่ำมาก การเกิดไฟฟ้าสถิตบนร่างกายจากการเดินหรือเคลื่อนไหวจะเกิดขึ้นมาก ดังนั้นเมื่อร่างกายสัมผัสกับวัสดุประเภทโลหะหรือตัวนำจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไปยังตัวนำนั้นอย่างรวดเร็ว อาทิเช่น การเดินไปจับลูกบิดประตู ทำให้เกิดอาการสะดุ้งเหมือนถูกไฟฟ้าดูดได้

การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสของวัสดุ หรือ Triboelectricity หรือ tribocharge เกิดจากการถ่ายเทของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสองขณะสัมผัส จากรูปที่ 2.1 อะตอมของวัสดุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า จะประกอบด้วยโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียส ซึ่งจะมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนที่โคจรรอบ ๆ นิวเคลียสนั้น จำนวนของโปรตอนทำให้ประจุเป็นบวกที่มีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนที่ให้ประจุเป็นลบ ทำให้อะตอมนั้นมีประจุเป็นกลาง เมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกัน อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายเทจากผิวสัมผัสของวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง เมื่อวัสดุทั้งสองถูกแยกออกจากกัน วัสดุที่ไม่สมดุลโดยมีอิเล็กตรอนขาดหายไป จะแสดงคุณสมบัติเป็นบวก และวัสดุที่ไม่สมดุลโดยที่ได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น จะแสดงคุณสมบัติเป็นลบ [4]



รูปที่ 2.1 การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัส (ก) และแยกออกจากกันของวัสดุ (ข)

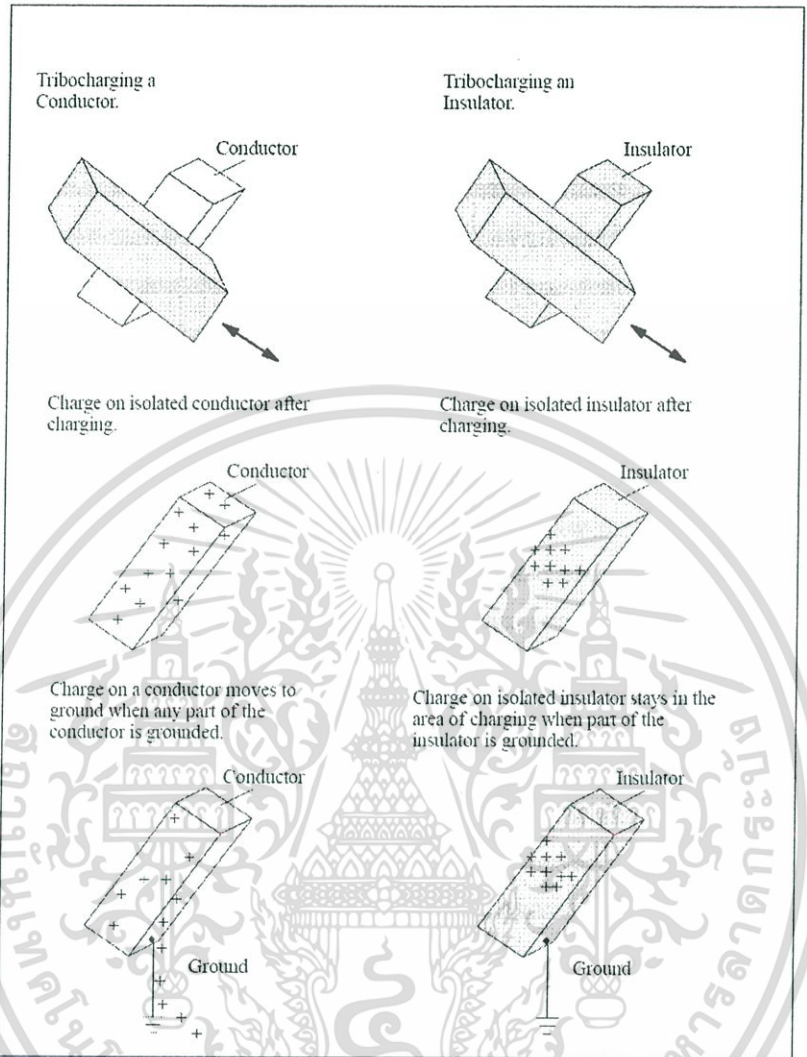
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่วัสดุใดจะมีความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนได้ดีเพียงใดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น หรือ การที่วัสดุใดจะแสดงคุณสมบัติเป็นบวกหรือลบ เมื่อสัมผัสกับวัสดุอื่นนั้น จะขึ้นอยู่กับลำดับของ Triboelectric หรือ Triboelectric Series ดังตารางที่ 2.1 โดยมีลักษณะการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสและการถ่ายเทประจุ ดังรูปที่ 2.2 และการแลกเปลี่ยนประจุเนื่องจาก Work Function ของวัสดุที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.3

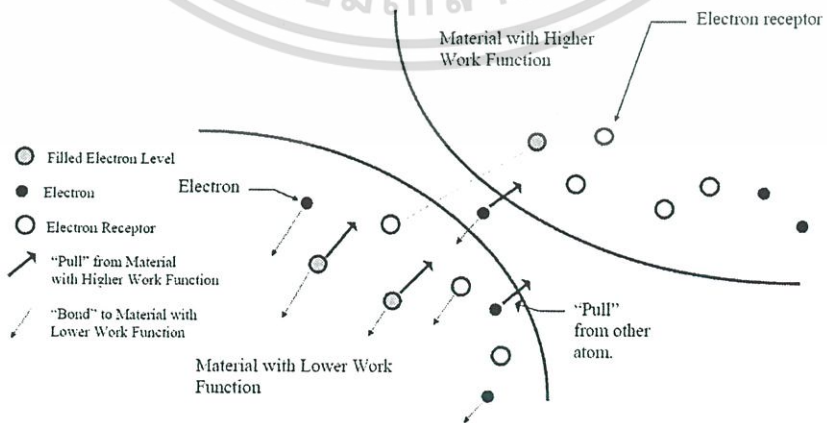
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการเกิดไฟฟ้าสถิต ตาม Triboelectric Series ของวัสดุ [4]

Positive (+)	
	Rabbit fur
	Glass
	Mica
	Human hair
	Nylon
	Wool
	Fur
	Lead
	Silk
	Aluminum
	Paper
	Cotton
	Steel
	Wood
	Amber
	Sealing Wax
	Hard rubber
	Nickel, copper
	Brass, silver
	Gold, platinum
	Sulfur
	Acetate rayon
	Polyester
	Celluloid
	Orlon
	Polyurethane
	Polyethylene
	Polypropylene
	PVC
	KEL F
	Silicon
	Teflon
Negative (-)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต [4]



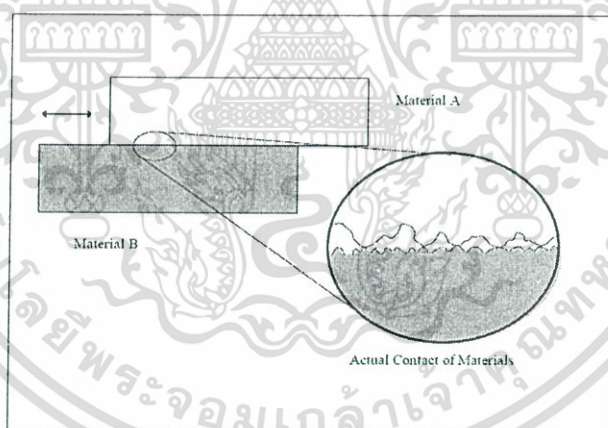
รูปที่ 2.3 การแลกเปลี่ยนประจุของวัสดุเนื่องจาก Work Function ของวัสดุที่แตกต่างกัน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1 แสดงถึงลำดับของ Triboelectric โดยเมื่อนำวัสดุดังกล่าวมาสัมผัสกัน วัสดุที่อยู่ด้านบนของตารางจะให้คุณสมบัติเป็นบวกเมื่อสัมผัสกับวัสดุที่อยู่ต่ำกว่าของตาราง ตัวอย่างเช่น เมื่อนำผ้าสักหลาด (Fur) มาสัมผัสกับแท่งอำพัน (Ambur) ที่อยู่ลำดับต่ำกว่า ผ้าสักหลาดจะให้ประจุที่เป็นบวก และแท่งอำพันจะให้ประจุที่เป็นลบ เป็นต้น

ในกรณีของวัสดุที่เป็นฉนวน ปริมาณไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะสูง เนื่องจากการสะสมของประจุ (Charge Accumulation) หลังจากการสัมผัส ซึ่งไม่สามารถถ่ายเทไปยังบริเวณอื่นได้เนื่องจากความต้านทานของฉนวนที่มีค่าสูง ในกรณีของวัสดุที่เป็นตัวนำหรือมีสภาพความนำไฟฟ้าที่ดีกว่า ประจุจะสามารถถ่ายเทไปยังบริเวณอื่นได้ และสามารถถ่ายเทลงสู่กราวด์ในกรณีที่ต่อวัสดุนั้นลงสู่จุดกราวด์ ทำให้วัสดุมีประจุลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2

วัสดุที่เกิดไฟฟ้าสถิตต่ำจะถูกเรียกว่าวัสดุ Antistatic หรือ Low Charge ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุชนิดนี้ อาจไม่ขึ้นอยู่กับการต้านทานทางไฟฟ้า ถึงแม้ว่าวัสดุที่เป็นตัวนำ (Conductive) หรือเป็นดิสซิเปทีฟ (Dissipative) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภท Antistatic ก็ตาม ปัจจัยหลักของการเป็น Antistatic ก็คือ การมีบริเวณผิวสัมผัสที่ลดการเสียดทานของการสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ตัวอย่างได้แก่ถุงพลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่เป็นฉนวนและให้เกิดไฟฟ้าสถิตสูง ถ้าผสมหรือนำมาเคลือบด้วยสารเคมีที่ให้คุณสมบัติในการเป็น Antistatic ก็จะทำให้ผิวสัมผัสกลายเป็น Moisture Layer และลดความสามารถในการเกิดประจุได้ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ลักษณะผิวสัมผัสของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของปริมาณไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น [4]

2.2 ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ

จากที่กล่าวข้างต้นว่า ไฟฟ้าสถิตเกิดจากการสัมผัสของวัสดุ การที่ไฟฟ้าสถิตจะสะสมอยู่บนวัสดุหรือถ่ายเทไปได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนั้น ๆ เป็นสำคัญ อาทิเช่น ความต้านทานทางไฟฟ้า

1. วัสดุที่เป็นฉนวน (Insulative) จะป้องกันหรือจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เป็นวัสดุที่ประจุผ่านพื้นผิวได้น้อยมากหรือไม่ได้เลยเนื่องจากมีความต้านทานสูง หมายความว่าประจุที่อยู่บนฉนวนชั้นหนึ่ง จะมีได้ทั้งกลุ่มของประจุบวกและกลุ่มของประจุลบในเวลาเดียวกัน และอาจคงอยู่เป็นเวลานาน เนื่องจากไม่สามารถถ่ายเทไปยังจุดอื่นหรือถ่ายเทไปยังกราวด์ได้ ในการควบคุมไฟฟ้าสถิต บรรจุภัณฑ์ที่เป็นฉนวนคือ วัสดุที่มีความต้านทานสูงกว่า 10^{11} โอห์ม และสำหรับวัสดุพื้นผิว อาทิเช่น พื้นโต๊ะหรือพื้นห้อง คือวัสดุที่มีความต้านทานสูงกว่า 10^9 โอห์ม ดังแสดงในตารางสรุปที่ 2.2

2. วัสดุที่เป็นดิสซิเพทีฟหรือสเตติกดิสซิเพทีฟ (Static Dissipative) เป็นวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในย่านระหว่างตัวนำและฉนวน ดังนั้นเมื่อเกิดไฟฟ้าสถิตขึ้นบนวัสดุประเภทนี้ ประจุไฟฟ้าสถิตจะสามารถถ่ายเทออกไปได้ ซึ่งจะเร็วกว่าวัสดุที่เป็นฉนวนแต่ช้ากว่าวัสดุที่เป็นตัวนำ โดยอาศัยคุณสมบัติข้อนี้ การถ่ายเทประจุจากชิ้นงานที่มีประจุไฟฟ้าสถิตอยู่ ผ่านวัสดุที่เป็นดิสซิเพทีฟ จะเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้ลดความเสียหายอันเนื่องมาจากกระแสไหลกระชากอย่างรวดเร็ว หรือ ZAP ได้

3. วัสดุที่เป็นตัวนำ (Conductive) เป็นวัสดุที่ประจุไหลผ่านพื้นผิวได้สะดวก มีความต้านทานต่ำ แต่ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานต่ำเท่ากับกรณีของสายตัวนำในวงจรไฟฟ้า วัสดุที่เป็นตัวนำก็สามารถเกิดไฟฟ้าสถิตบนตัววัสดุจากการสัมผัสได้เช่นเดียวกับฉนวนและดิสซิเพทีฟ แต่เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทประจุได้ดี จึงสามารถถ่ายเทประจุไปยังจุดกราวด์หรือบริเวณที่มีศักย์ต่ำกว่าได้ ข้อจำกัดอย่างหนึ่งสำหรับการใช้วัสดุตัวนำก็คือ การถ่ายเทของประจุอย่างรวดเร็วเกินไปและอาจเกิดปัญหาเนื่องจากกระแสไหลรวดเร็ว หรือ ZAP ได้ ตัวอย่างเช่น การถ่ายเทประจุจากขวางจรรวมที่มีประจุสะสมอยู่ไปยังผิวโต๊ะสแตนเลส เป็นต้น

ย่านความต้านทานของวัสดุพื้นผิวเช่นแผ่นบุโต๊ะและพื้น และย่านความต้านทานของวัสดุใช้งานบรรจุภัณฑ์ แสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 ย่านความต้านทานของวัสดุพื้นผิวเช่นแผ่นบุโต๊ะและพื้น [5]

ย่านความต้านทาน	ความต้านทาน	ลักษณะการวัดทดสอบ
ตัวนำ (Conductive)	น้อยกว่า 10^6 โอห์ม	แท่งอิเล็กโทรดมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หนัก 2.27 กิโลกรัม
ดิสซิเพทีฟ (Dissipative)	10^6 โอห์ม ถึง 10^9 โอห์ม	แท่งอิเล็กโทรดมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หนัก 2.27 กิโลกรัม
ฉนวน (Insulative)	มากกว่า 10^9 โอห์ม	แท่งอิเล็กโทรดมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หนัก 2.27 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

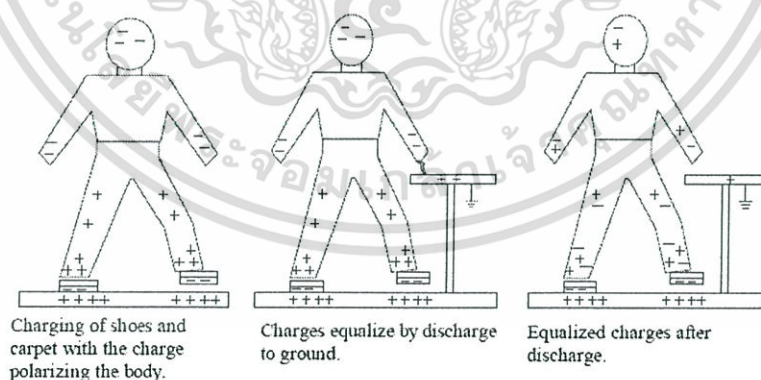
ตารางที่ 2.3 ย่านความต้านทานของวัสดุที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ [6]

Designation	Resistance (ohms)	Exponent Format
Shielding $<10^3$	10	10^1
	100	10^2
Conductive $<10^4$	1,000	10^3
	10,000	10^4
Dissipative $\geq 10^4$ to $<10^{11}$	100,000	10^5
	1,000,000	10^6
	10,000,000	10^7
	100,000,000	10^8
	1,000,000,000	10^9
Insulative $\geq 10^{11}$	10,000,000,000	10^{10}
	100,000,000,000	10^{11}

ANSI/ESD S541

2.3 การเกิดไฟฟ้าสถิตบนร่างกายจากการเคลื่อนไหว

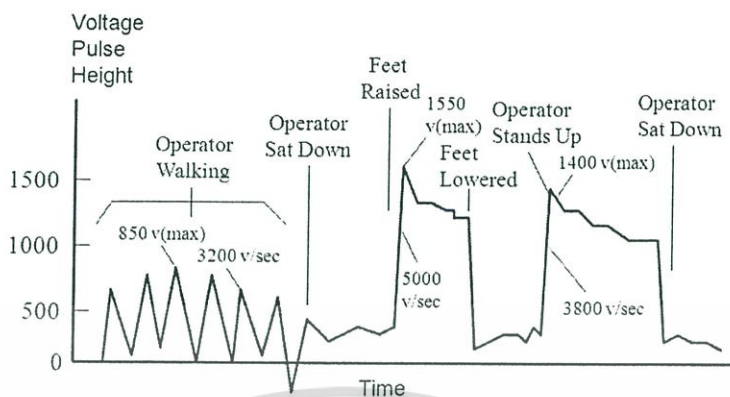
ปริมาณประจุที่เกิดขึ้นบนร่างกายจะเกิดขึ้นจากการสัมผัสของวัสดุขณะร่างกายเคลื่อนไหวในอิริยาบถต่าง ๆ เช่น ขณะเดิน องค์ประกอบสำคัญที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าสถิตบนร่างกายก็คือ การสัมผัสระหว่างรองเท้าและพื้น และเสื้อผ้าที่สวมใส่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกิดไฟฟ้าสถิตบนร่างกายจากการสัมผัสของรองเท้าและพื้นขณะร่างกายเคลื่อนไหว

ปริมาณประจุที่เกิดขึ้นบนร่างกายจะเกิดขึ้นขณะร่างกายเคลื่อนไหวในอิริยาบถต่าง ๆ ซึ่งก่อให้เกิดไฟฟ้าสถิตดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายขณะร่างกายเคลื่อนไหว

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณแรงดันที่เกิดขึ้นบนร่างกาย ประจุที่เกิดขึ้นจะสะสมอยู่บนร่างกายเสมือนตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง ปริมาณแรงดันมีความสัมพันธ์กับปริมาณประจุตั้งสมการ

$$q = CV \tag{2.1}$$

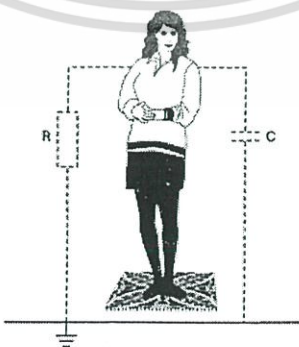
q = ปริมาณประจุ (คูลอมป์)

C = ความจุของร่างกาย (ฟาราด)

V = ปริมาณแรงดัน (โวลต์)

แบบจำลองที่จะแสดงความจุของร่างกายแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งโดยปกติความจุของร่างกายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 100 – 400 พิโคฟาราด (pF) ขึ้นอยู่กับอิริยาบถ ตัวอย่างเช่น ถ้าร่างกายขณะยืนมีความจุ 200pF ถูกชาร์จจนมีแรงดัน 3 กิโลโวลต์ ประจุนร่างกายจะมีปริมาณเท่ากับ

$$\begin{aligned} q &= CV = (200 \times 10^{-12}) \times 3000 \text{ คูลอมป์} \\ &= 6 \times 10^{-7} \text{ คูลอมป์} \end{aligned} \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.7 แบบจำลองที่แสดงความจุของร่างกายที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามอิริยาบถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของความจุของร่างกายและปริมาณแรงดัน ตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 จึงสามารถอธิบายได้เพิ่มเติมว่า ถึงแม้ร่างกายจะไม่ได้เคลื่อนที่และเสียดสี ที่จะก่อให้เกิดปริมาณประจุจากการสัมผัสในปริมาณมากขึ้น แต่ถ้าความจุของร่างกายเปลี่ยนไป อาทิเช่น เปลี่ยนอิริยาบถจากยืนเป็นนั่ง หรือการยกขาขึ้นขณะนั่งเก้าอี้ ก็จะทำให้แรงดันที่วัดได้บนร่างกายมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การเปลี่ยนแปลงอิริยาบถของร่างกายที่มีผลต่อความจุ แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความจุของร่างกายที่อิริยาบถต่าง ๆ [7]

Description of movement	Initial Capacitance (pF)	Final Capacitance (pF)	% Change
Person seated raising one foot	192	163	15% Decrease
Personal seated, picking up both feet pacing them on foot rest	192	129	33% Decrease
Person seated, leaning forwards in chair (desk type chair with back)	192	184	4% Decrease
Standing person raising one foot	167	141	16% Decrease
Seated person standing up	192	167	13% Decrease

เมื่อร่างกายที่มีประจุไฟฟ้าสถิตไปสัมผัสกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีศักย์ต่ำกว่า ก็เกิดการถ่ายเทหรือดิสชาร์จของประจุไปยังชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยแบบจำลองการถ่ายเทประจุจากร่างกาย (Human Body Model) หรือ HBM ซึ่งยังมีแบบจำลองการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตแบบอื่นๆ ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.4 ความเสียหายของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และแบบจำลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิต

ความเสียหายของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เกิดได้จาก 3 ลักษณะ คือ

- การดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตเข้าสู่ตัวชิ้นงาน (ESD to the device)
- การดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตออกจากตัวชิ้นงาน (ESD from the device)
- การเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้าสถิต (Field induced discharges)

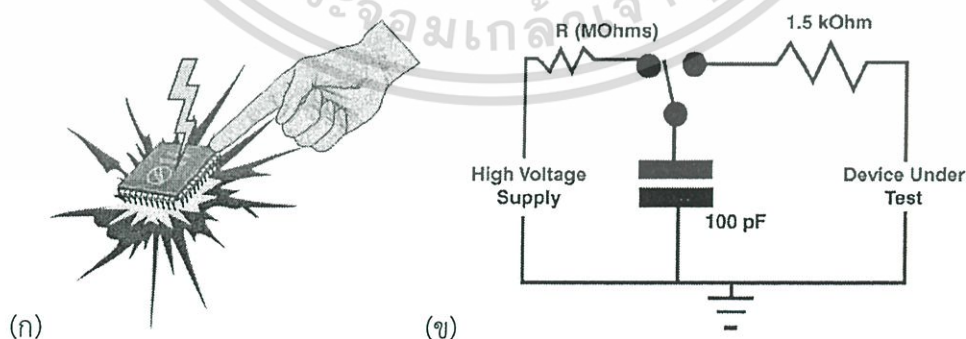
ปัญหาที่พบได้บ่อยของการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าสถิต คือเกิดการดิสชาร์จโดยตรงของไฟฟ้าสถิตจากร่างกายเข้าสู่ตัวชิ้นงาน อาทิเช่นการเกิดไฟฟ้าสถิตสะสมจากการเดิน แล้วบุคคลหรือพนักงานคนนั้นเดินไปหยิบชิ้นงาน หรือการเกิดไฟฟ้าสถิตบนวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ อาทิเช่นเครื่องจักรหรือเครื่องมือ และดิสชาร์จโดยตรงเข้าสู่ตัวชิ้นงาน เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ การถ่ายเทของประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเข้าสู่ตัวชิ้นงาน หรือออกจากตัวชิ้นงาน จะถูกเรียกว่าการดิสชาร์จประจุของไฟฟ้าสถิต หรือ Electrostatic Discharge (ESD) ซึ่งต่างจากการถ่ายเทหรือระบายไฟฟ้าสถิตลงกราวด์เพื่อลดหรือกำจัดไฟฟ้าสถิตจากวัสดุต่างๆ เช่น การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายผ่านทางสายรัดข้อมือ หรือการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากเครื่องมือเครื่องจักรลงสู่ระบบกราวด์ เพื่อลดปัญหาการสะสมไฟฟ้าสถิต ที่จะถูกเรียกว่า Electrostatic Dissipation

ความเสียหายของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตสามารถแสดงได้ด้วยแบบจำลอง 3 วิธี คือ [4]

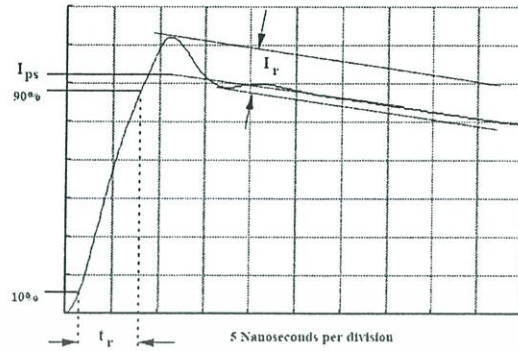
1. แบบจำลองการดิสชาร์จจากร่างกาย (Human Body Model : HBM) ซึ่งก็คือ การถ่ายเทของไฟฟ้าสถิตจากร่างกายไปยังชิ้นงาน
2. แบบจำลองการดิสชาร์จจากเครื่องจักร (Machine Model : MM) ซึ่งก็คือการถ่ายเทของไฟฟ้าสถิตจากเครื่องมือหรือเครื่องจักรไปยังชิ้นงาน
3. แบบจำลองการดิสชาร์จจากชิ้นงานที่มีประจุสะสม (Charged Device Model : CDM) ซึ่งก็คือ การถ่ายเทของไฟฟ้าสถิตที่สะสมบนอุปกรณ์หรือชิ้นงานไปยังวัตถุอื่น

ขณะร่างกายเคลื่อนไหวจะเกิดประจุจากการสัมผัสหรือ Triboelectric Charge ขึ้นบนร่างกายเสมือนตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง เมื่อร่างกายสัมผัสกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีศักย์ต่ำกว่า ก็เกิดการถ่ายเทของประจุจากร่างกายไปยังชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้นอย่างรวดเร็ว เมื่อกระแสที่เกิดจากประจุไหลได้มาก ความร้อนที่เกิดจากไหลของกระแสจะสูง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนนั้นทันที ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยแบบจำลองการดิสชาร์จจากร่างกาย หรือ Human Body Model ดังรูปที่ 2.8 และลักษณะจำเพาะของรูปคลื่นจากแบบจำลองการดิสชาร์จของไฟฟ้าสถิตจากร่างกายไปยังชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยแบบจำลองนี้ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาจะถูกนำมาใช้มากที่สุด เพราะการจับถือชิ้นส่วนโดยพนักงานในแผนกต่าง ๆ จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุด ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการรับและตรวจสอบวัตถุดิบ จนกระทั่งส่งของไปยังลูกค้า



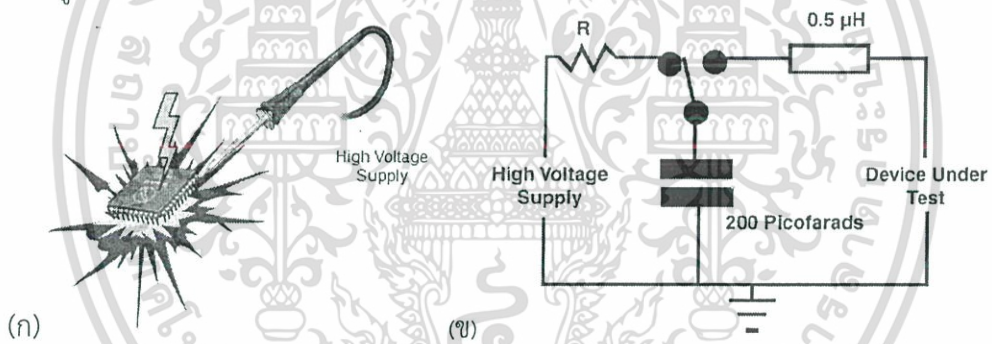
รูปที่ 2.8 ลักษณะการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากร่างกายไปยังชิ้นงาน (ก) และวงจรสมมูลที่ใช้ทดสอบ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

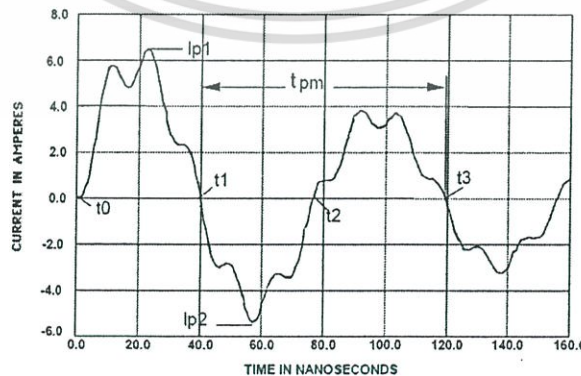


รูปที่ 2.9 ลักษณะจำเพาะของรูปคลื่นจากแบบจำลองการดิสชาร์จของไฟฟ้าสถิตจากร่างกายไปยังชิ้นงาน

ในกรณีที่ เป็นเครื่องมือหรือเครื่องจักร เช่น เครื่องทดสอบ (Tester) หรือเครื่องประกอบชิ้นงานลงบอร์ด (Surface Mount Feeder Machine) ที่มีประจุค้ำอยู่ เมื่อเครื่องจักรจับตัวชิ้นงาน การถ่ายเทประจุก็จะเกิดขึ้นทันที จะเป็นแบบจำลองการดิสชาร์จจากเครื่องจักร หรือ Machine Model ดังรูปที่ 2.10 และลักษณะจำเพาะของรูปคลื่นจากแบบจำลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากเครื่องมือไปยังชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.11



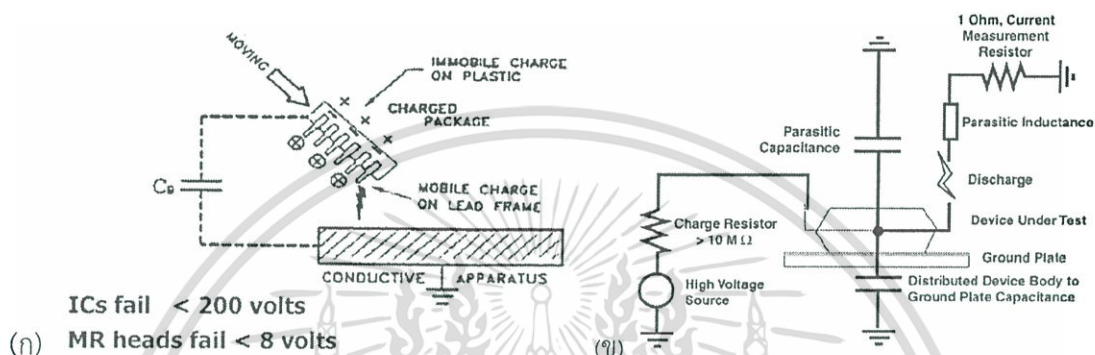
รูปที่ 2.10 ลักษณะการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากเครื่องมือเครื่องจักรไปยังชิ้นงาน (ก) และวงจรสมมุติที่ใช้ทดสอบ (ข)



รูปที่ 2.11 ลักษณะจำเพาะของรูปคลื่นจากแบบจำลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากเครื่องมือไปยังชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ชิ้นงานเสียดสีกับหลอดบรรจุหรือบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ และเกิดประจุสะสมอยู่บนชิ้นงานนั้น แล้วไปสัมผัสกับวัสดุอื่น เช่น โตะสแตนเลส จะเกิดการถ่ายเทประจุจากชิ้นงานไปยังวัสดุนั้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานได้เช่นกัน นั่นคือ แบบจำลองการดิสชาร์จจากชิ้นงานที่มีประจุสะสม หรือ Charged Device Model ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานที่มีประจุไปยังวัสดุอื่น (ก) และวงจรสมมูลที่ใช้ทดสอบ (ข)

เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะของการดิสชาร์จและวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ของการถ่ายเททั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกัน อาทิเช่น แบบจำลองการดิสชาร์จจากร่างกายมีความต้านทาน 1.5 กิโลโอห์ม เพื่อจำลองความต้านทานของผิวหนังร่างกายขณะสัมผัสชิ้นงาน แบบจำลองการดิสชาร์จจากเครื่องจักรจะเกิดจากการถ่ายเทประจุจากเครื่องมือหรือเครื่องจักร ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะ วงจรของแบบจำลองจึงไม่มีความต้านทาน 1.5 กิโลโอห์มดังกล่าว แต่ถูกทดแทนด้วยค่าความเหนี่ยวนำขนาด 0.5 ไมโครเฮนรี่ เป็นต้น

2.5 ความไวของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่อระดับไฟฟ้าสถิต

ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งจะมีความไว (ESD Sensitivity) หรือความทนทานต่อไฟฟ้าสถิต (ESD Susceptibility) ที่แตกต่างกันตามแบบจำลองการดิสชาร์จที่ต่างกัน ตัวอย่างความไวของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ต่อระดับไฟฟ้าสถิตจากแบบจำลองร่างกาย (Human Body Model : HBM) และแบบจำลองการดิสชาร์จจากชิ้นงานที่มีประจุสะสม (Charged Device Model : CDM) แสดงได้ดังตารางที่ 2.5 [4]

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างความไวของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่อระดับไฟฟ้าสถิต

เสียหายจากไฟฟ้าสถิตที่ระดับ 0 ถึง 1,999 โวลต์ HBM
<p>Microwave devices (Schottky barrier diodes, point contact diodes and other detector diodes > 1 GHz)</p> <p>Discrete MOSFET devices</p> <p>Surface acoustic wave (SAW) devices</p> <p>Junction field effect transistors (JFETs)</p> <p>Charged coupled devices (CCDs)</p> <p>Precision voltage regulator diodes (line of load voltage regulation, < 0.5%)</p> <p>Operational amplifiers (OP AMPS)</p> <p>Thin film resistors</p> <p>Integrated circuits</p> <p>AMR and GMR Disk Drive Recording Heads</p> <p>Laser Diodes</p> <p>Hybrids</p> <p>Very high speed integrated circuits (VHSIC)</p> <p>Silicon controlled rectifiers (SCRs) with $I_o < 0.175$ amp at 100 °C ambient</p>
เสียหายจากไฟฟ้าสถิตที่ระดับ 2000 ถึง 3,999 โวลต์ HBM
<p>Discrete MOSFET devices</p> <p>JFETs</p> <p>Operational Amplifiers (OP Amps)</p> <p>Integrated circuits (ICs)</p> <p>Very high speed integrated circuits (VHSIC)</p> <p>Precision resistor networks (type RZ)</p> <p>Hybrids</p> <p>Low power bipolar transistors</p>
เสียหายจากไฟฟ้าสถิตที่ระดับน้อยกว่า 1000 โวลต์ CDM
<p>Discrete MOSFET devices</p> <p>Gate coupled devices like SCRs and NMOS</p> <p>NMOS type devices</p> <p>Integrated circuits (ICs)</p> <p>Very high speed integrated circuits (VHSIC) like RF type device</p> <p>Storage devices (AMR, GMR and TMR Disk Drive Recording Heads)</p> <p>Nanotechnology-type devices</p> <p>MEMs type devices</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอีกลักษณะหนึ่ง ระดับความไวหรือความทนทานต่อไฟฟ้าสถิต สามารถแบ่งได้เป็นระดับ หรือ class ตามรูปแบบของการดิสชาร์จ ตารางที่ 2.6 แสดงความไวตามแบบจำลองร่างกาย หรือ HBM ซึ่งจะแตกต่างจากตารางที่ 2.7 และ 2.8 ซึ่งเป็นแบบจำลองเครื่องจักร หรือ MM และแบบจำลองการดิสชาร์จจากชิ้นงาน หรือ CDM ตามลำดับ [8]

ตารางที่ 2.6 แสดงระดับความไวต่อไฟฟ้าสถิตตามแบบจำลองการดิสชาร์จจากร่างกาย หรือ HBM

Class	Voltage Range
Class 0	<250 volts
Class 1A	250 volts to <500 volts
Class 1B	500 volts to < 1,000 volts
Class 1C	1000 volts to < 2,000 volts
Class 2	2000 volts to < 4,000 volts
Class 3A	4000 volts to < 8000 volts
Class 3B	>= 8000 volts

ตารางที่ 2.7 แสดงระดับความไวต่อไฟฟ้าสถิตตามแบบจำลองการดิสชาร์จจากเครื่องจักร หรือ MM

Class	Voltage Range
Class M1	<100 volts
Class M2	100 volts to <200 volts
Class M3	200 volts to <400 volts
Class M4	> or = 400 volts

ตารางที่ 2.8 แสดงระดับความไวต่อไฟฟ้าสถิตตามแบบจำลองการดิสชาร์จจากอุปกรณ์ หรือ CDM

Class	Voltage Range
Class C1	<125 volts
Class C2	125 volts to <250 volts
Class C3	250 volts to <500 volts
Class C4	500 volts to <1,000 volts
Class C5	1,000 volts to <1,500 volts
Class C6	1,500 volts to <2,000 volts
Class C7	=>2,000 volts

ในปัจจุบัน การแบ่งระดับความไวหรือความทนทานต่อไฟฟ้าสถิต เป็น class แทบไม่ได้ถูกเรียกอีกต่อไป แต่ใช้การระบุระดับความไวหรือความทนทานเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสถิต อาทิเช่น วงจรรวมชนิดนี้ มีความไวต่อไฟฟ้าสถิตที่ระดับ 100 โวลต์ หรือวงจรรวมชนิดนี้ ต้องการการควบคุมไฟฟ้าสถิตที่ระดับต่ำกว่า 100 โวลต์ จาก Human Body Model เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การควบคุมไฟฟ้าสถิต

โดยการการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตลงสู่ระบบกราวด์

การควบคุมไฟฟ้าสถิต หรือการป้องกันความเสียหายอันจะเกิดขึ้นจากดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตมีอยู่หลายวิธี ได้แก่การออกแบบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตมากขึ้น การหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุหรือกระบวนการที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าสถิตสูง การป้องกันการรบกวนของสนามไฟฟ้า (Shielding) โดยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม และสำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนหรือวัสดุที่เป็นตัวนำที่ไม่สามารถต่อลงกราวด์ได้ อาจใช้การแลกเปลี่ยนประจุให้วัสดุนั้นมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยใช้พัดลม Ionized Air Blower

แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดในการป้องกันความเสียหายอันจะเกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิตต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ก็คือ การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นดังกล่าว ลงสู่ระบบกราวด์อย่างเหมาะสม ก่อนที่ไฟฟ้าสถิตจะดิสชาร์จไปยังชิ้นงาน หรือถ่ายเทลงสู่ระบบกราวด์เพื่อให้ระดับไฟฟ้าสถิตลดลงและไม่เป็นอันตรายต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ถึงแม้จะเกิดการดิสชาร์จก็ตาม การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตนี้ครอบคลุมถึงการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนร่างกายที่มีการใช้สายรัดข้อมือและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสม การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตสำหรับการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมากโดยพิจารณาถึงความต้านทานผิวหนังและความสามารถในการถ่ายเทประจุขณะวางบนแผ่นบูโตะแบบดิสซิเปทีฟ การต่อกราวด์ของเครื่องจักร เครื่องมือ หรืออุปกรณ์ช่วยประกอบ (jig) และการทดสอบระบบกราวด์โดยคำนึงถึงความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันตกคร่อมในวงจรที่เกิดจากความต้านทานดังกล่าว

3.1 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายด้วยสายรัดข้อมือหรือ Wrist Strap

จุดประสงค์ของการใช้สายรัดข้อมือและสายต่อกราวด์ ก็เพื่อป้องกันไม่ให้ไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนร่างกายอันเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวในอิริยาบถต่าง ๆ สะสมอยู่บนร่างกาย องค์ประกอบสำคัญในการถ่ายเทประจุ สามารถอธิบายได้โดยสมการของการถ่ายเทประจุผ่านความต้านทานและค่าความจุ

$$V = V_0 \cdot \text{EXP} (-t)/RC \quad (3.1)$$

ให้ค่าความต้านทานของร่างกายเทียบกราวด์มีค่า 10 เมกโอห์ม แรงดัน 5000 โวลต์ ที่เกิดขึ้นบนร่างกายจะใช้เวลาถ่ายเทลงสู่กราวด์ จนลดลงมีค่า 10 โวลต์ จะใช้เวลา 0.0125 วินาที

$$V = 10 \text{ โวลต์} \text{ กรณีนี้ถือเป็นแรงดันของร่างกายที่ปลอดภัยที่สามารถจับถืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้โดยไม่ทำความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านั้น}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_0	=	5000 โวลต์ ให้เป็นแรงดันเริ่มแรกที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวของร่างกาย
T	=	เวลาที่ใช้ในการถ่ายเทประจุจากระดับแรงดัน V_0 มาจนกระทั่ง V
C	=	ความจุของร่างกาย มีค่า 200 พิโคฟารัด
R	=	ความต้านทาน 10 เมกโอห์ม

ค่าความต้านทานซึ่งปกติจะถูกต่อรวมอยู่กับสายรัดข้อมือนั้น เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีผู้สวมใส่สัมผัสกับระบบไฟฟ้า หรือมีกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านไปที่จุดต่อกราวด์ของสายรัดข้อมือ โดยทั่วไปจะใช้ค่าความต้านทานขนาด 0.25 วัตต์ 1 เมกโอห์ม ซึ่งค่าความต้านทานนี้ถูกเลือกมาจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จะถูกจำกัดไม่ให้เป็นอันตรายต่อร่างกายผู้สวมใส่ ดังกระแสที่เกิดขึ้นจากแรงดัน 220 โวลต์ ตามสมการที่ 3.2 จะมีค่า 0.22 มิลลิแอมป์ ซึ่งอยู่ในบรรทัดแรกของตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร่างกายในระดับต่างๆ โดยในช่วง 0 – 0.5 มิลลิแอมป์ ร่างกายจะไม่มีรู้สึก หรือรู้สึกเพียงเล็กน้อย

$$I = V/R \quad (3.2)$$

$$= 220/1 \times 10^6 = 0.22 \text{ มิลลิแอมป์}$$

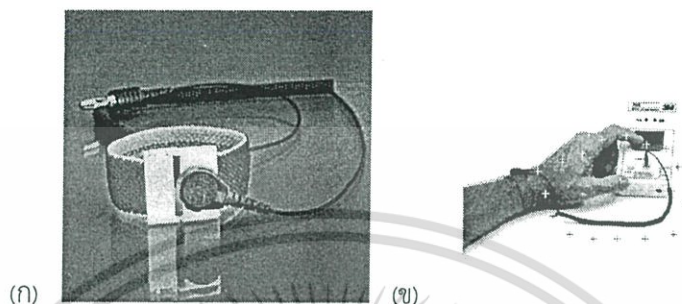
ตารางที่ 3.1 ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร่างกาย

ปริมาณกระแสไฟฟ้า	ผลกระทบต่อร่างกาย
0 – 0.5 มิลลิแอมป์	ไม่รู้สึก / รู้สึกเพียงเล็กน้อย
0.5 – 1 มิลลิแอมป์	รู้สึกเพียงเล็กน้อย
1 – 5 มิลลิแอมป์	รู้สึกเจ็บปวดเล็กน้อย
5 – 10 มิลลิแอมป์	รู้สึกเจ็บปวด
มากกว่า 10 มิลลิแอมป์	ไม่สามารถขยับตัวได้
100 มิลลิแอมป์ – 2 แอมป์	กล้ามเนื้อเกร็งและอาจเสียชีวิต
มากกว่า 2-3 แอมป์	ผิวหนังเป็นรอยไหม้

นอกจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายรัดข้อมือดังกล่าวมาแล้วจากข้างต้น สายรัดข้อมือควรสวมใส่สบาย ไม่รัดแน่นหรือหลวมเกินไป มีประสิทธิภาพในการสัมผัสผิวหนังได้ดีและต้องไม่ระคายเคืองกับผิวหนังของผู้สวมใส่ วัสดุที่นำมาทำเป็นสายรัดข้อมือควรทำจากผ้ายัดที่ถักทอด้วยใยตัวนำ หรืออาจทำจากโลหะหรือพลาสติกตัวนำ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการเป็นตัวนำและการสัมผัสกับผิวหนัง

ผู้สวมใส่ควรทดสอบความเป็นตัวนำทางไฟฟ้าของสายรัดข้อมืออย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสายรัดข้อมือยังอยู่ในสภาพดี สายตัวนำไม่ชำรุดและความต้านทานอยู่ในพิสัยที่กำหนด และสามารถถ่ายเทประจุจากร่างกายลงสู่กราวด์ได้อย่างเต็มที่ การตรวจสอบสายรัดข้อมือดังกล่าว ควรใช้ทุกครั้งก่อนเข้าทำงานในส่วนการผลิต โดยอาจมีการติดตั้งเครื่องทดสอบไว้บริเวณประตูทางเข้า พนักงานตรวจสอบแล้วว่าผ่านจึงจะสามารถเข้าไปทำงานในสายการผลิตได้ ในบางกรณีเครื่องตรวจสอบนี้อาจถูกต่อรวมกับ

ประตูเปิดอัตโนมัติ ซึ่งเมื่อตรวจสอบผ่าน พนักงานคนดังกล่าวจึงจะสามารถผ่านประตูเข้าไปทำงานได้ หรืออาจใช้ร่วมกับระบบบัตรประจำตัวของพนักงาน และต่อฟ่วงไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลของพนักงานแต่ละคน เป็นต้น



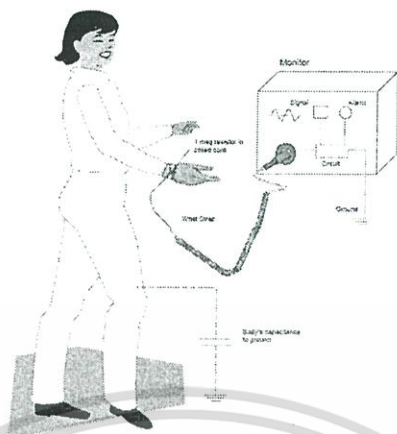
รูปที่ 3.1 สายรัดข้อมือ (ก) และตัวอย่างการทดสอบสายรัดข้อมือพร้อมสายต่อลงกราวด์ (ข)

3.2 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายผ่านสายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง

ในส่วนการผลิตที่มีการควบคุมไฟฟ้าสถิตในระดับต่ำมากและชิ้นส่วนที่พนักงานต้องจับถือมีราคาสูง การตรวจสอบสายรัดข้อมือก่อนเข้าทำงานทุกครั้งอาจไม่เพียงพอ จึงมีความต้องการสายรัดข้อมือที่มีการตรวจสอบการต่อลงกราวด์แบบตลอดเวลา โดยใช้วงจรีเล็กทรอนิกส์เข้ามาต่อร่วมกับสายรัดข้อมือ เมื่อใดที่สายรัดข้อมือชำรุดหรือจุดต่อลงกราวด์หลุด เครื่องจะแสดงความผิดปกติออกมาทันที โดยผ่านทางไฟแสดงสถานะหรือเสียงเตือน ซึ่งเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า สายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง (Real Time Wrist Strap Monitor or Continuous Wrist Strap Monitor) ชนิดของสายรัดข้อมือพร้อมสายต่อลงกราวด์ชนิดที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่องมีดังนี้ [9]

3.2.1 ชนิดตรวจสอบด้วยค่าความจุหรืออิมพีแดนซ์

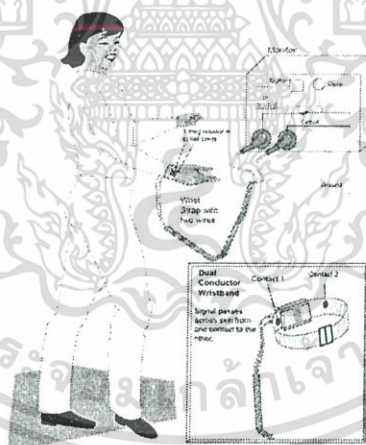
เครื่องมือชนิดนี้จะใช้สายรัดข้อมือแบบปกติ ซึ่งเป็นแบบสายตัวนำเดี่ยว (Single conductor wrist strap) ต่อร่วมกับชุดควบคุมที่เป็นทางเดินให้ไฟฟ้าสถิตไหลผ่านสู่กราวด์ และพร้อมกับวัดความจุร่างกาย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อใดที่สายรัดข้อมือชำรุดหรือสายขาด เครื่องจะแสดงความผิดปกติออกมาทันที



รูปที่ 3.2 สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่อง ชนิดสายตัวนำเดี่ยวและตรวจสอบด้วยค่าความจุ

3.2.2 ชนิดตรวจสอบด้วยค่าความต้านทาน

เครื่องมือชนิดนี้จะใช้สายรัดข้อมือแบบสายตัวนำคู่ (Dual conductor wrist strap) ต่อร่วมกับชุดวงจรควบคุม โดยจะวัดความต้านทานรวมผ่านสายเส้นหนึ่งไปยังข้อมือของผู้สวมใส่ ใช้ผิวหนังที่ข้อมือต่อวงจรและผ่านกลับมาโดยสายอีกเส้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.3

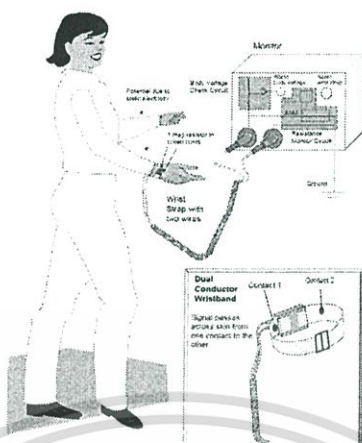


รูปที่ 3.3 สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่อง ชนิดสองสายและตรวจสอบด้วยค่าความต้านทาน

3.2.3 ชนิดตรวจสอบด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า

เครื่องมือชนิดนี้จะใช้สายรัดข้อมือแบบสายตัวนำคู่ (Dual conductor wrist strap) เช่นกัน ต่อร่วมกับชุดวงจรควบคุม โดยจะวัดระดับแรงดันไฟฟ้าสถิตบนร่างกาย ไม่ให้เกินค่าที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

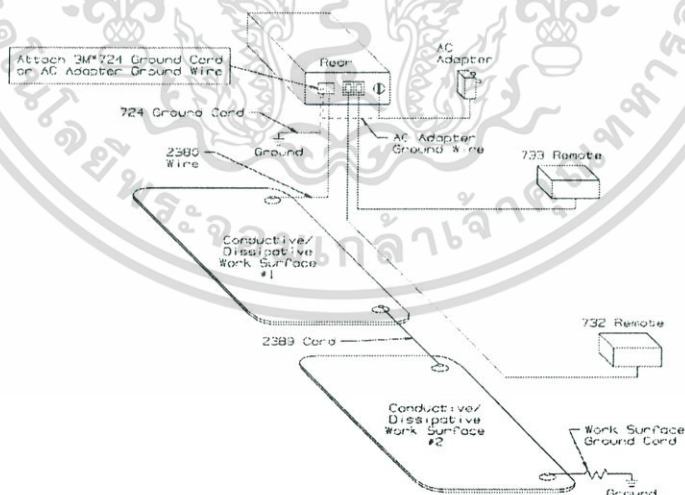
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 สายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่อง ชนิดสายตัวนำคู่ และตรวจสอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า

คุณสมบัติเพิ่มเติมของสายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ชนิดที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่อง ได้แก่

1. สามารถวัดการต่อลงกราวด์ของโต๊ะทำงานแบบตลอดเวลา แสดงในรูปที่ 3.5
2. สามารถวัดการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา
3. การบันทึกข้อมูลของความผิดปกติ, เวลา หรือรายละเอียดอื่น ๆ โดยต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์ที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะผ่านทางระบบสื่อสารไปยังห้องควบคุม หรือแผนกควบคุมคุณภาพสินค้า

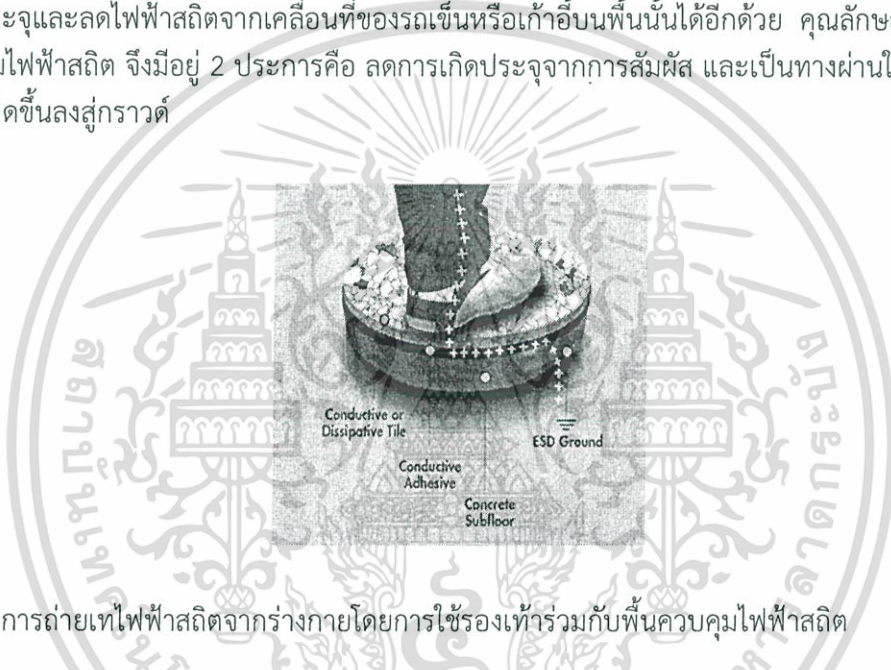


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างคุณสมบัติเพิ่มเติมของสายรัดข้อมือพร้อมสายต่อกราวด์ชนิดที่ทำงานร่วมกับวงจรตรวจสอบแบบต่อเนื่องโดยสามารถวัดการต่อลงกราวด์ของโต๊ะทำงานแบบตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายด้วยรองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต

สาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งของการเกิดไฟฟ้าสถิตในการทำงานก็คือ การเคลื่อนไหวของร่างกาย โดยเฉพาะการสัมผัสของรองเท้าและพื้นขณะนั่งหรือเดิน การลดและควบคุมไฟฟ้าสถิตให้ได้ผลมากที่สุด คือการใช้พื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตร่วมกับรองเท้าตัวนำ เพื่อถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายลงสู่ระบบกราวด์ ดังรูปที่ 3.6 โดยเฉพาะในลักษณะงานที่พนักงานไม่ได้นั่งอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวตลอดเวลา ซึ่งไม่สามารถใช้สายรัดข้อมือได้ หรือลักษณะงานที่พนักงานทำงานอยู่ใกล้เครื่องจักรและอาจเกิดอันตรายจากสายรัดข้อมือกับเครื่องจักรที่อยู่รอบข้าง เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้พื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตยังมีประโยชน์ในการถ่ายเทประจุและลดไฟฟ้าสถิตจากเคลื่อนที่ของรถเข็นหรือเก้าอี้บนพื้นนั้นได้อีกด้วย คุณลักษณะของพื้นที่ใช้ควบคุมไฟฟ้าสถิต จึงมีอยู่ 2 ประการคือ ลดการเกิดประจุจากการสัมผัส และเป็นทางผ่านในการถ่ายเทประจุที่เกิดขึ้นลงสู่กราวด์



รูปที่ 3.6 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกายโดยการใช้อุปกรณ์ร่วมกับพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต

ข้อจำกัดในการใช้พื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตร่วมกับรองเท้า มีอยู่ 2 ประการ ประการแรกคือ ในการทำงานที่พนักงานนั่งบนเก้าอี้ พนักงานควรใส่สายรัดข้อมือร่วมด้วยตลอดเวลา เพราะถ้าพนักงานนั่งโดยไม่ได้วางเท้าบนพื้นก็จะไม่สามารถถ่ายเทประจุที่เกิดขึ้นผ่านรองเท้าสู่พื้นได้ ข้อจำกัดที่สองคือราคาของพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตพร้อมกาวตัวนำ (Conductive adhesive) และการติดตั้งซึ่งเป็นการลงทุนครั้งแรกที่สูง รวมทั้งการติดตั้งบนพื้นคอนกรีตต้องมีความระมัดระวังเรื่องความชื้น ถ้าเป็นอาคารใหม่ควรจะมีการก่อสร้างที่ป้องกันความชื้นจากพื้นดินไว้แต่แรก ถ้าพื้นคอนกรีตมีความชื้นสูง อาจมีความจำเป็นต้องใช้กาวตัวนำชนิดพิเศษที่มีแรงยึดติดมากขึ้น หรืออาจจำเป็นต้องใช้สารเคมีป้องกันความชื้นทาที่คอนกรีตก่อนจะมีการติดตั้งพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต เป็นต้น

3.3.1 ชนิดและการเลือกใช้พื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต

1. พื้นชนิดอีพ็อกซี (ESD Epoxy Flooring)

ข้อดี บำรุงรักษาง่าย ทนทานต่อรอยขีดข่วน ค่าความต้านทานสม่ำเสมอ ทนทานต่อสารเคมี รับแรงกดได้สูงมาก สะอาด ใช้ในห้องสะอาดได้ ไม่มีรอยต่อของแผ่นต่อแผ่น

ข้อเสีย การติดตั้งต้องอาศัยผู้ชำนาญงานและราคาสูงมาก ไม่สะดวกในการซ่อมแซม

2. พื้นชนิดไวนิล (ESD Vinyl Flooring)

ข้อดี ทนทานต่อรอยขีดข่วนได้ปานกลาง ติดตั้งและซ่อมแซมง่าย ติดตั้งบนพื้นชนิดยกสูง (Raised Access) ได้

ข้อเสีย มีรอยต่อแผ่นต่อแผ่น รับแรงกดจากเครื่องจักรได้จำกัด ต้องทำความสะอาดและบำรุงรักษาสม่ำเสมอ

3. พื้นชนิดแผ่นม้วน (ESD Floor Mat)

ข้อดี ติดตั้งและเคลื่อนย้ายสะดวก ราคาถูกโดยเฉพาะการติดตั้งในบริเวณเล็ก ๆ ค่าความต้านทานสม่ำเสมอ

ข้อเสีย ไม่ทนทานต่อรอยขีดข่วน ราคาสูงถ้าติดตั้งบริเวณกว้าง รับแรงกดได้จำกัด ไม่ทนทานต่อสารเคมี

4. สีชนิดตัวนำหรือดิสซิเพทีฟ (Dissipative Paint)

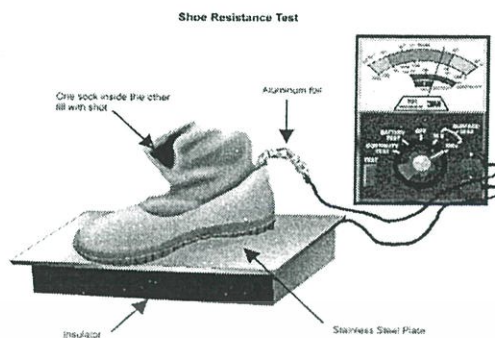
ข้อดี ใช้งานง่าย ราคาถูก แต่อาจไม่สามารถวัดความต้านทานได้ตามมาตรฐาน

ข้อเสีย ต้องบำรุงรักษาบ่อยเนื่องจากสีลอกหรือกระเทาะเนื่องจากการใช้งานหรือความชื้นของพื้นคอนกรีต

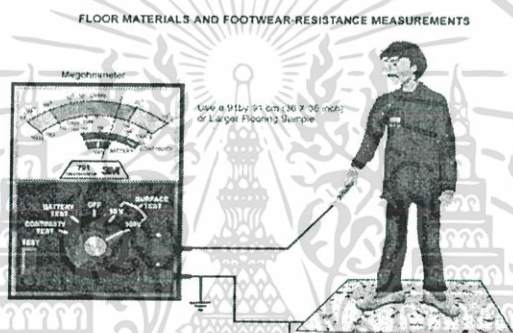
ในลักษณะงานที่ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้นั่งอยู่กับที่ ซึ่งไม่สามารถใช้สายรัดข้อมือสำหรับถ่ายเทประจุลงกราวด์ได้ การใช้รองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตร่วมกับพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตเป็นสิ่งที่สำคัญมาก และถึงแม้ว่าผู้ปฏิบัติงานจะสวมสายรัดข้อมือก็ตาม การใช้รองเท้าและพื้นเป็นการถ่ายเทประจุอีกทางหนึ่งซึ่งช่วยให้ความเชื่อถือของระบบควบคุมไฟฟ้าสถิตสูงขึ้น

3.3.2 การทดสอบพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตและรองเท้า

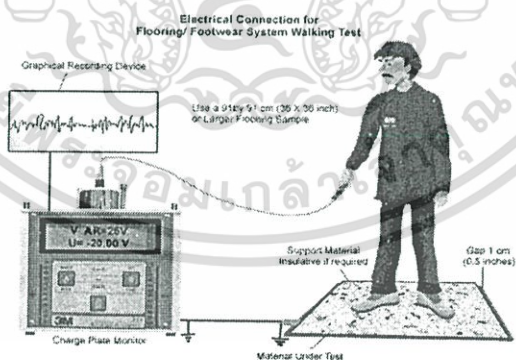
การใช้รองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตก็เพื่อจุดประสงค์ในการลดไฟฟ้าสถิตจากการเคลื่อนไหวของร่างกาย โดยเฉพาะการสัมผัสกันระหว่างรองเท้าและพื้นขณะนั่งหรือเดิน การวัดความต้านทาน ใช้เครื่องมือวัดความต้านทานเช่นเดียวกับการวัดพื้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 และการวัดไฟฟ้าสถิตจากการเคลื่อนไหวของร่างกาย ใช้เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าสถิตบนร่างกาย ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 การวัดความต้านทานของรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิต [10]



รูปที่ 3.8 การวัดความต้านทานรวมของร่างกายร่วมกับรองเท้าและพื้น [10]

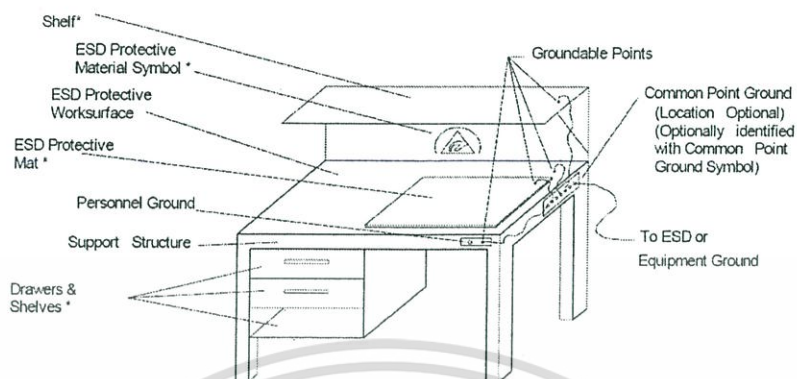


รูปที่ 3.9 การวัดความปริมาณไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากรองเท้าและพื้น [10]

3.4 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตของโต๊ะทำงานหรือ Workstation

การควบคุมไฟฟ้าสถิตของโต๊ะทำงาน ใช้หลักการถ่ายเทประจุที่เกิดขึ้นลงสู่กราวด์เพื่อลดประจุสะสม โดยผ่านทางพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์ ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

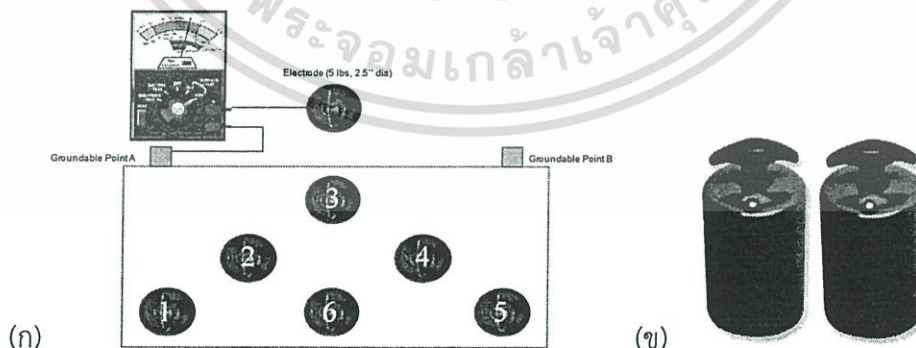


รูปที่ 3.10 การควบคุมไฟฟ้าสถิตของโต๊ะทำงานด้วยพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์ [3]

การวัดความต้านทานของพื้นผิวควบคุมไฟฟ้าสถิตมีข้อกำหนดดังนี้ [11]

1. ให้ใช้เครื่องมือวัดความต้านทานย่านความต้านทานสูง หรือ Megohm Meter ที่มีความแม่นยำในการทดสอบ +/- 10% มีแรงดันในการวัดเมื่อเปิดวงจร (Open Circuit Test Voltage) ที่ 10 โวลต์ และ 100 โวลต์ ที่ ± 10%
2. เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน เครื่องมือวัดควรมีการจำกัดกระแสในการวัดอยู่ที่น้อยกว่า 5 มิลลิแอมแปร์
3. อิเล็กโทรดที่ใช้วัดต้องมีน้ำหนัก 2.27 กิโลกรัม (5 ปอนด์) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร (2.5 นิ้ว) และส่วนที่สัมผัสกับพื้นที่ที่จะใช้วัด จะต้องรองด้วยวัสดุตัวนำที่มีความแข็ง 50-70 shore A

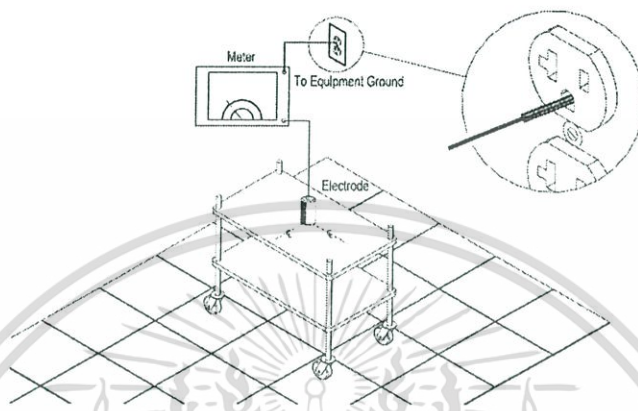
วิธีการวัด มีวิธีการวัด 2 วิธีคือ วัดความต้านทานจากพื้นผิวถึงพื้นผิว (Surface to Surface) และการวัดความต้านทานจากพื้นผิวสู่จุดกราวด์ (Surface to Ground) ดังรูปที่ 3.11



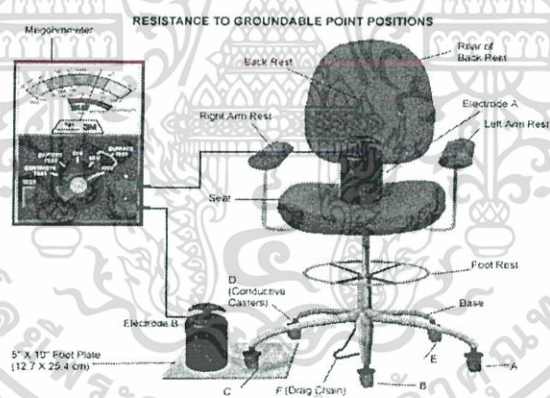
รูปที่ 3.11 การวัดความต้านทานเพื่อตรวจการลงกราวด์ของพื้น (ก) และแท่งอิเล็กโทรดมาตรฐานที่ใช้ในการวัด (ข) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หนัก 2.27 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดความต้านทานและอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว เพื่อทดสอบวัสดุอื่นๆ แสดงในรูปที่ 3.12 รูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 อาทิเช่น การทดสอบรถเข็น เก้าอี้ และชุดคลุม (Smock or jump suit) เป็นต้น

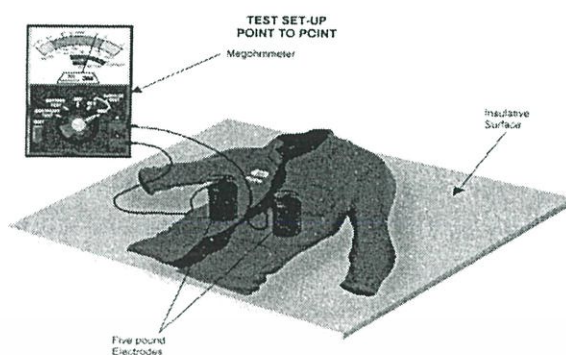


รูปที่ 3.12 การวัดระบบกราวด์รถเข็นด้วยแท่งอิเล็กทรอนิกส์มาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หนัก 2.27 กิโลกรัม



รูปที่ 3.13 การวัดระบบกราวด์ของเก้าอี้ด้วยแท่งอิเล็กทรอนิกส์มาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หนัก 2.27 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



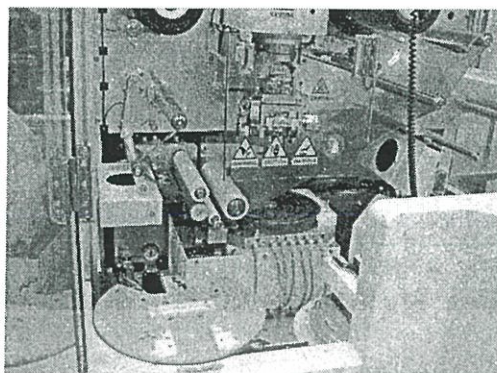
รูปที่ 3.14 การวัดระบบความต้านทานของเสื้อผ้าด้วยแท่งอิเล็กโทรดมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้วหนัก 2.27 กิโลกรัม

3.5 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตของเครื่องจักรหรือเครื่องมือด้วยระบบกราวด์

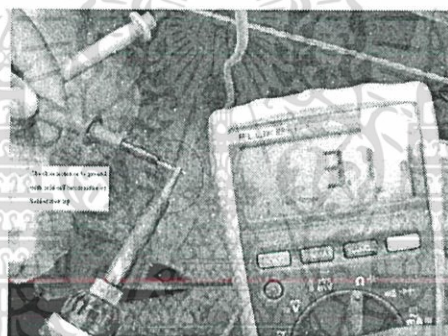
จากการพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ จากการใช้พนักงานจับถือและประกอบเป็นหลัก ปัจจุบันได้เปลี่ยนมาเป็นการผลิตและประกอบด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติ หรืออัตโนมัติ ด้วย Automate Handling Equipment (AHE) ทำให้ความเสียหายของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการดิสชาร์จแบบ Machine Model หรือจากการดิสชาร์จจากเครื่องมือหรือเครื่องจักรไปยังชิ้นงาน และการดิสชาร์จแบบ Charged Device Model ซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตที่สะสมบนอุปกรณ์หรือชิ้นงานไปยังวัตถุอื่น มีความสำคัญและถูกนำมากำหนดเป็นระดับควบคุมในกระบวนการผลิตมากขึ้น และอาจมากกว่า Human Body Model ซึ่งกลายเป็นการระดับควบคุมพื้นฐาน ดังนั้นความสำคัญของระบบกราวด์ของเครื่องจักร Automate Handling Equipment จึงมีมากขึ้นเช่นกัน

ความซับซ้อนของเครื่องจักร เครื่องมือ หรือเครื่องมือช่วยประกอบ (Tooling Jig) และความต้องการให้ทุกชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีโอกาสสัมผัสชิ้นงานถูกต้องลงกราวด์เพื่อลดไฟฟ้าสถิตนั้น เป็นสิ่งที่ทำให้การต่อกราวด์เป็นไปด้วยความยุ่งยาก ดังรูปที่ 3.15 รวมทั้งการหมุนหรือการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงของเครื่องจักร อาจทำให้ไม่สามารถใช้การเดินสายกราวด์ไปยังส่วนที่ต้องการได้เลย หรือสามารถต่อสายกราวด์ได้แต่ไม่สามารถตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบกราวด์ขณะเครื่องจักรทำงานหรือเคลื่อนไหวได้ หรือแม้กระทั่งการเลือกใช้วิธีการหรือเครื่องมือวัดที่ไม่ถูกต้อง

ในปัจจุบันการตรวจสอบระบบกราวด์ทำโดยการวัดความต้านทานของส่วนต่างๆของเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และเป็นการตรวจสอบระบบกราวด์โดยทั่วไปโดยการวัดความต้านทานด้วย Digital Multimeter



รูปที่ 3.15 ความซับซ้อนของเครื่องจักรทำให้การต่อกราวด์และตรวจสอบระบบกราวด์ของชิ้นส่วนต่างๆ เป็นไปด้วยความยุ่งยาก โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ไปหยิบจับชิ้นงาน

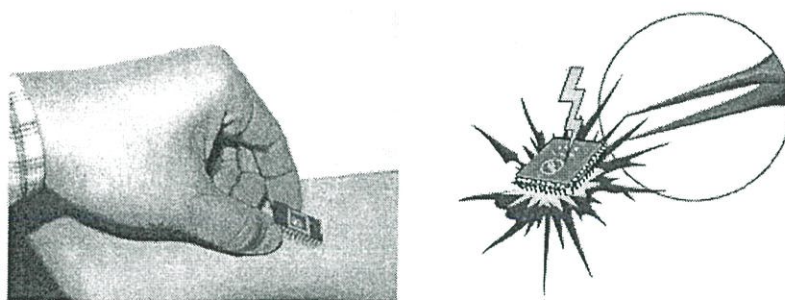


รูปที่ 3.16 การตรวจสอบระบบกราวด์โดยทั่วไปของเครื่องจักรหรือเครื่องมือโดยการวัดความต้านทาน ด้วย Digital Multimeter

3.6 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านอุปกรณ์จับถือหรือคีมหยิบชิ้นงาน

ในสายการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ถึงแม้ว่าจะใช้พนักงานประกอบเป็นหลัก แต่การจับถือและการประกอบส่วนใหญ่ไม่ได้ใช้มือในการหยิบจับชิ้นงานโดยตรง แต่ใช้อุปกรณ์จับถือ อาทิเช่น คีมหยิบขนาดเล็ก หรือ tweezers ที่อาจเป็นโลหะ ดังนั้น การพิจารณาโอกาสของความเสียหายของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เดิมจะเกิดจากการดิสชาร์จแบบ Human Body Model ซึ่งจะมีความต้านทานผิวหนังในวงจรสมมูลด้วยนั้น อาจเปลี่ยนแปลงไปและมีความคล้ายคลึงกับการดิสชาร์จจากโลหะไปยังโลหะ (metal-to-metal) ซึ่งได้แก่การดิสชาร์จแบบ Machine Model และ Charged Device Model มากขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์จับถือชิ้นงาน จะต้องคำนึงถึงความสามารถและลักษณะการถ่ายเทประจุของอุปกรณ์ดังกล่าวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 การที่มีได้ใช้นิ้วมือในการหยิบจับชิ้นงานโดยตรง แต่ใช้อุปกรณ์จับถือหรือคีมหยิบขนาดเล็กในการหยิบจับชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์

หลักการสำคัญในการป้องกันความเสียหายอันจะเกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิตต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์คือ การถ่ายเทหรือระบายไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นดังกล่าว ลงสู่ระบบกราวด์อย่างเหมาะสม ก่อนที่ไฟฟ้าสถิตจะดิสชาร์จไปยังชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาและออกแบบการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตและระบบกราวด์ โดยครอบคลุมถึง การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนร่างกายพนักงานที่มีการใช้สายรัดข้อมือและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสม การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตสำหรับการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมากลงกราวด์โดยพิจารณาถึงความต้านทานผิวสัมผัสและความสามารถในการถ่ายเทประจุขณะวางชิ้นส่วนนั้นบนแผ่นปูโต๊ะแบบดิสซิเพทีฟ การต่อกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือ และการทดสอบระบบกราวด์โดยคำนึงถึงกระแสที่ไหลในระบบกราวด์ ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันตกคร่อมในวงจรที่เกิดจากความต้านทานดังกล่าว

4.1 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมและการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากร่างกาย

เพื่อให้การวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าสถิตบนร่างกาย อันเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวมามีค่าที่แน่นอนและสามารถทำซ้ำได้ อุปกรณ์และวิธีการทดสอบจึงได้ถูกกำหนดขึ้นดังนี้ [1]

1. เครื่องมือวัดประจุนิตที่มี Input Impedance สูงกว่า 1×10^{14} โอห์ม และมีค่าความจุ
2. น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 พิโคฟาราด สามารถวัดแรงดันได้ตั้งแต่ 10 ถึง 5000 โวลต์ ที่มีความแน่นอน $\pm 10\%$ ต่อร่วมกับอิเล็กโทรดสำหรับจับถือที่ทำจาก Stainless Steel มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ยาว 7.5 เซนติเมตร ในการทดลอง ใช้ Charge Analyzer รุ่น 711 บริษัท 3M ประเทศไทย จำกัด
3. พื้นผิวที่จะใช้ทดสอบที่ติดตั้งอยู่บนวัสดุที่เป็นฉนวนหนา 5 มิลลิเมตร กว้าง 36 นิ้ว ยาว 36 นิ้ว ทำการ Condition ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 72 ชั่วโมง ก่อนทำการทดลอง
4. เครื่องมือวัดความต้านทาน Surface Tester พร้อมอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว หนัก 5 ปอนด์ รุ่น 701 บริษัท 3M ประเทศไทย จำกัด
5. เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้น
6. สายรัดข้อมือชนิดผ้าและพลาสติก และสายต่อกราวด์ รุ่น 2214 และรุ่น 4650 บริษัท 3M ประเทศไทย จำกัด
7. ความต้านทานปรับค่าได้ แบบ 0-200 เมกโอห์ม ($\pm 10\%$ Resistor)
8. รองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิต ทำความสะอาดพื้นผิวด้วยส่วนผสม 70% แอลกอฮอล์-น้ำ และวางไว้ในบริเวณทดสอบ เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างน้อย 72 ชั่วโมง ก่อนทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

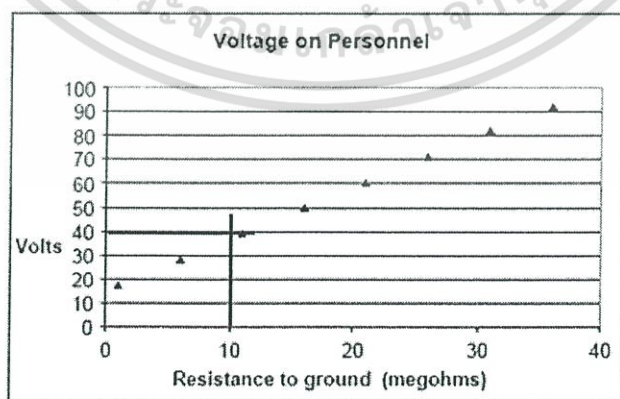
4.1.1 ปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายที่ผิวหนังแห้งหรือระบบสายรัดข้อมือชำรุด

เป็นการศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายขณะที่ความต้านทานผิวหนังหรือความต้านของสายรัดข้อมือที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจเกิดจากผิวหนังแห้งหรือสายรัดข้อมือเริ่มชำรุด จำลองระบบการควบคุมไฟฟ้าสถิตบนร่างกายของพนักงานในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สายรัดข้อมือเพียงอย่างเดียว โดยไม่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตร่วมด้วย การทดลองนี้จำลองโดยให้ผู้ทดลองใส่สายรัดข้อมือที่อนุกรมกับความต้านทานปรับค่าได้ โดยผู้ทดสอบสวมรองเท้ายางเดินบนแผ่นกระเบื้องยางเพื่อจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตสูงสุด หรือ worst case แล้วทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานปรับค่าได้ที่ต่ออนุกรมกับสายรัดข้อมือ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



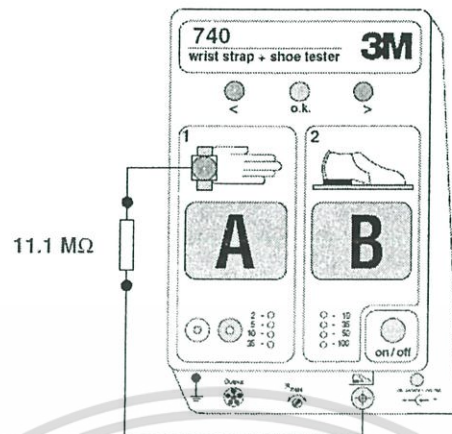
รูปที่ 4.1 ความต้านของสายรัดข้อมือที่เพิ่มขึ้นซึ่งจำลองผิวหนังแห้งหรือระบบสายรัดข้อมือเริ่มชำรุด

ค่าความต้านทานที่ต่อลงกราวด์ที่มีค่าสูงขึ้น ร่างกายจะใช้เวลาในการถ่ายเทประจุมากขึ้น จึงสามารถวัดแรงดันสะสมบนร่างกายได้สูงกว่าที่ค่าความต้านทานต่ำ จากรูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการกำหนดออกแบบค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ของระบบสายรัดข้อมือ ที่ชิ้นงานมีความไวต่อไฟฟ้าสถิตที่ 40 โวลต์ ในแกน Y ว่าควรจะยอมรับความต้านทานร่างกาย ในแกน X ที่สูงสุดที่ 10 เมกโอห์ม เป็นต้น และนำค่านี้ไปตั้งค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ของการทดสอบระบบสายรัดข้อมือ ที่ 10 เมกโอห์ม บนเครื่องทดสอบสายรัดข้อมือ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการกำหนดออกแบบค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ของระบบสายรัดข้อมือ ที่ชิ้นงานมีความไวต่อไฟฟ้าสถิตที่ 40 โวลต์ ค่าความต้านทานร่างกายที่สูงสุด ควรตั้งไว้ที่ 10 เมกโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

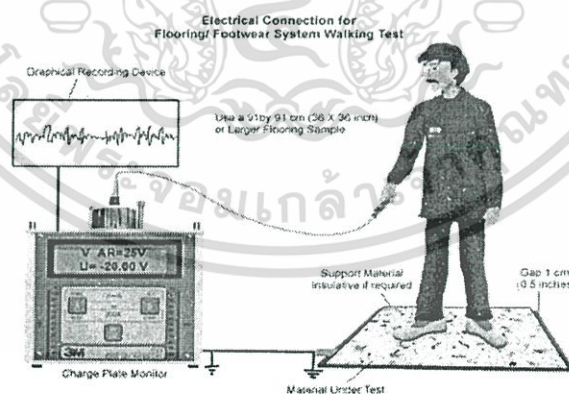


รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการตั้งค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ของระบบสายรัดข้อมือ ที่ 10 เมกโอห์ม บนเครื่องทดสอบสายรัดข้อมือ หรือ wrist strap tester ตามการออกแบบในรูปที่ 4.2

4.1.2 ปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะเดิน เมื่อใช้เฉพาะรองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต

เป็นการศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายที่เกิดจากการเลือกใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตชนิดต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายและใช้อยู่ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ซึ่งจำลองระบบการควบคุมไฟฟ้าสถิตบนร่างกายของพนักงานในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต

การทดลองนี้ไม่ใช้สายรัดข้อมือต่อร่วมด้วย เพื่อจะวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการเลือกใช้รองเท้าและพื้นเท่านั้น โดยแสดงการวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าสถิตบนร่างกายขณะเดินหรือเคลื่อนไหว ดังรูปที่ 4.4

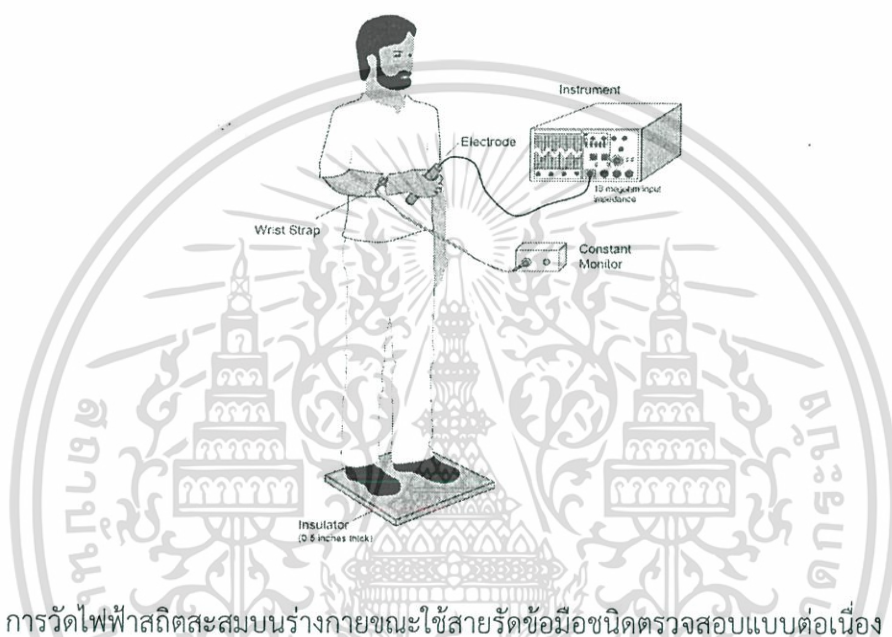


รูปที่ 4.4 การวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าสถิตบนร่างกายอันเนื่องมาจากเดินหรือการเคลื่อนไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง

เป็นการศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง และเป็นกรณีที่แย่ที่สุด (worst case) โดยไม่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตร่วมด้วย การทดลองนี้ จำลองโดยให้ผู้ทดลองใส่สายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง โดยผู้ทดสอบสวมรองเท้ายางและยืนบนแผ่นกระเบื้องยางที่เป็นฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การวัดไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิดตรวจสอบแบบต่อเนื่อง

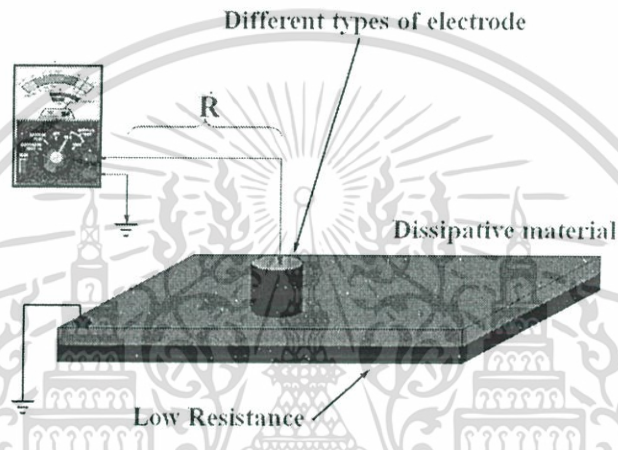
การศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิดตรวจวัดแบบตลอดเวลา นั้น ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้นอกจากรูปแบบการใช้งานแล้ว สิ่งที่สำคัญที่สุดคือแรงดันตกคร่อมที่ร่างกายและปลายนิ้วพนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบดังกล่าวซึ่งอาจส่งผลต่อชิ้นงานได้ [12] ควรทดสอบและเลือกใช้เพื่อให้มั่นใจว่า แรงดันที่ร่างกายพนักงานจะต้องน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสถิตที่ชิ้นงานนั้นสามารถทนได้ สำหรับการออกแบบระบบสายรัดข้อมือชนิดนี้ ควรใช้แรงดันในการตรวจวัดความต้านทานของร่างกายให้น้อยที่สุด เพื่อให้เกิดแรงดันที่ร่างกายพนักงานน้อยที่สุดเช่นกัน

4.2 การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานขนาดเล็กผ่านพื้นผิวดิสซีเปทีฟ

จากการเลือกใช้พื้นผิวดิสซีเปทีฟปูโต๊ะเพื่อจุดประสงค์ในการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากอุปกรณ์ต่างๆ และจากชิ้นงานลงสู่กราวด์นั้น การวัดความต้านทานของพื้นผิวดังกล่าวตามข้อกำหนด ให้ใช้เครื่องมือวัดความต้านทานย่านความต้านทานสูงร่วมกับแท่งอิเล็กโทรดน้ำหนัก 2.27 กิโลกรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตรนั้น ดังรูปที่ 4.6 ถ้าเปรียบเทียบน้ำหนักของแท่งอิเล็กโทรดดังกล่าว กับน้ำหนักของชิ้นงานขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







เล็กที่อาจมีน้ำหนักเพียง 1 กรัมหรือน้อยกว่านั้น ความต้านทานพื้นผิวที่เกิดจากความต้านทานที่ผิวสัมผัสอาจมีค่าสูงชัน และอาจมากจนไฟฟ้าสถิตไม่สามารถไหลผ่านพื้นผิวดังกล่าวลงสู่กราวด์ตามที่ต้องการได้ การทดสอบใช้การจำลองขนาดของชิ้นงานที่เล็กและเบาลง ด้วยขนาดของอิเล็กโทรดที่เล็กและเบาลงตามลำดับ จากแท่งทรงกลมที่เล็กลงจนกระทั่งมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เพียง 5 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักเพียง 1.1 กรัม เพื่อศึกษาแนวโน้มของความต้านทานดังกล่าว โดยขนาดของแท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กลงเพื่อจำลองชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.6 การวัดความต้านทานของพื้นผิวดิสซีเปทีฟที่วัดจากขนาดของแท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กลงเพื่อจำลองชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงเพื่อจำลองชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก

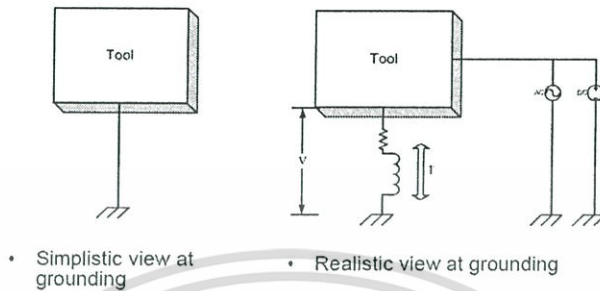
ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์	พื้นที่ (ตร.มม)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก/พื้นที่	ลักษณะรูปร่าง
63mm dia, 2.27 kg	3115.67	2270	0.729	ทรงกระบอก ตาม มาตรฐาน ESD S4.1 
50mm dia, 0.335 kg	1962.50	335	0.171	ทรงกระบอก สูง 20mm 
50mm dia, 0.167 kg	1962.50	167	0.085	ทรงกระบอก สูง 10mm 
20mmx20mmx20mm	400	69	0.173	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ 
10mmx10mmx10mm	100	8.6	0.086	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ 
5mmx5mmx5mm	25	1.1	0.044	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ 

4.3 การตรวจสอบระบบกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือ

นอกจากความซับซ้อนของเครื่องจักรและเครื่องมือ และความต้องการให้ทุกชิ้นส่วนของเครื่องจักรถูกต่อลงกราวด์เพื่อลดไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้การต่อกราวด์เป็นไปได้ด้วยความยุ่งยากแล้วนั้น การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบกราวด์ยังต้องการวิธีการหรือเครื่องมือวัดที่เหมาะสม ที่สามารถวัดความต้านทานขณะมีกระแสไหลในสาย หรือมีสัญญาณรบกวนความถี่สูง หรือ high frequency

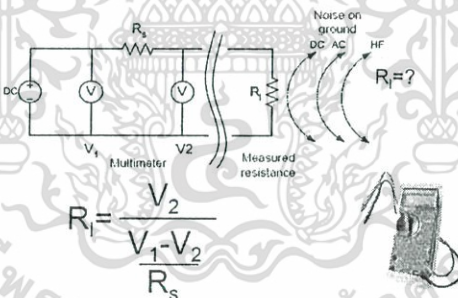
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

noise ได้ ดังรูปที่ 4.7 ที่แสดงพารามิเตอร์ของการต่อกราวด์ที่เกิดขึ้นจริงจากระบบกราวด์และกระแสที่ไหลในระบบกราวด์

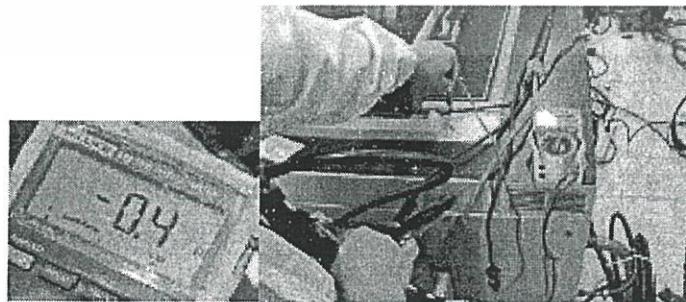


รูปที่ 4.7 พารามิเตอร์ของการต่อกราวด์ที่เกิดขึ้นจริงจากระบบสายและกระแสที่ไหลในระบบกราวด์

การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบกราวด์ในปัจจุบันยังคงใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบปกติ ที่อาจไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อลักษณะการวัดความต้านทานขณะมีกระแสไหลในสายหรือมีสัญญาณความถี่สูงในสายกราวด์ได้ รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการวัดความต้านทานระบบกราวด์และกระแสที่ไหลในระบบกราวด์ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบปกติ และรูปที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานที่วัดได้ ที่อาจคลาดเคลื่อนเนื่องจากกระแสที่ไหลในระบบกราวด์



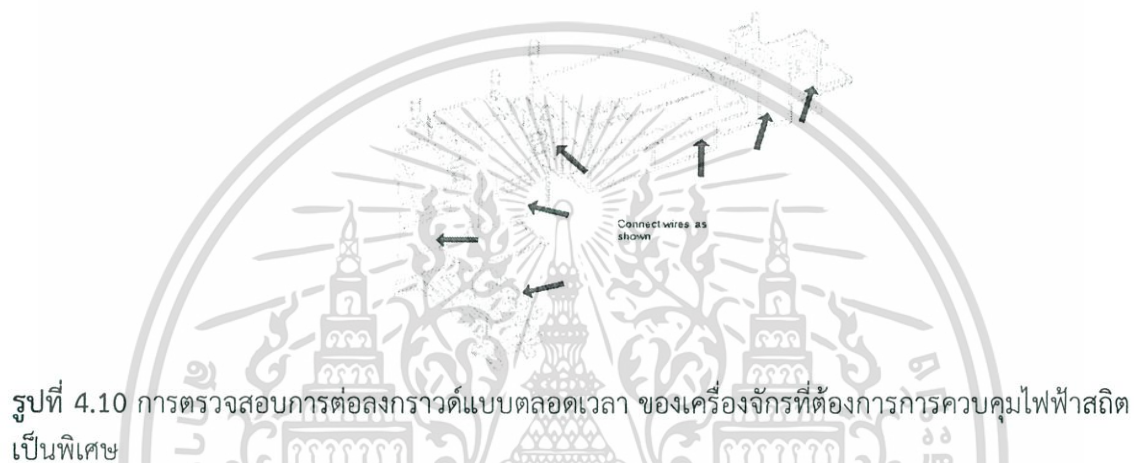
รูปที่ 4.8 การวัดความต้านทานระบบกราวด์และกระแสที่ไหลในระบบกราวด์



รูปที่ 4.9 ความต้านทานที่วัดได้อาจคลาดเคลื่อนเนื่องจากกระแสที่ไหลในระบบกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

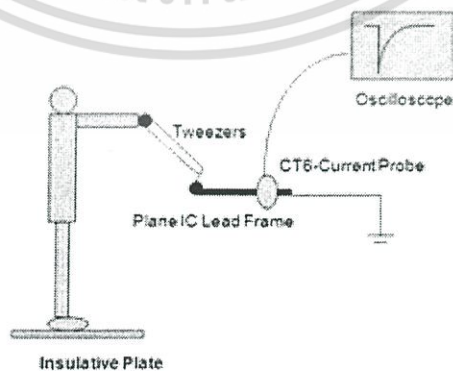
การออกแบบการตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบกราวด์ด้วยวิธีการหรือเครื่องมือวัดที่เหมาะสม ที่สามารถวัดความต้านทานขณะมีกระแสไหลในสาย หรือมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้ จะทำให้สามารถที่จะวัดการต่อลงกราวด์แบบตลอดเวลาได้ และสามารถกำหนดค่าความต้านทานสูงสุดได้ เช่น 1 โอห์ม 5 โอห์ม หรือ 10 โอห์ม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ที่เป็นตัวอย่างความต้องการที่จะตรวจสอบการต่อลงกราวด์แบบตลอดเวลา ของจุดต่างๆ ของเครื่องจักรที่ต้องการการควบคุมไฟฟ้าสถิตเป็นพิเศษ เมื่อจุดใดจุดหนึ่งเกิดความผิดพลาด ก็จะแสดงผลด้วยเสียงเตือน ไฟแสดงผล หรือหยุดการทำงานของเครื่องจักรในพื้นที่ เป็นต้น



รูปที่ 4.10 การตรวจสอบการต่อลงกราวด์แบบตลอดเวลา ของเครื่องจักรที่ต้องการการควบคุมไฟฟ้าสถิตเป็นพิเศษ

4.4 การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านอุปกรณ์จับถือชิ้นงาน

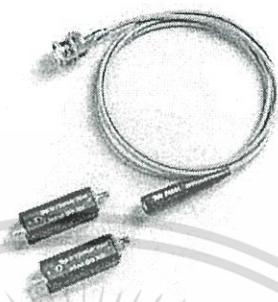
ในการศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตของอุปกรณ์จับถือชิ้นงาน อาทิเช่น คีมหยิบขนาดเล็ก หรือ tweezers ในที่นี้เลือกใช้การวัดกระแสที่ถูกดิสชาร์จ ผ่านทางหม้อแปลงกระแสขนาดเล็ก รุ่น CT-6 ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการเลือกใช้อุปกรณ์จับถือชิ้นงาน โดยคำนึงถึงความสามารถและลักษณะการถ่ายเทประจุของอุปกรณ์ดังกล่าว



รูปที่ 4.11 การดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการทดลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ ผ่านทางหม้อแปลงกระแสขนาดเล็ก รุ่น CT-6 ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การวัดกระแสที่ถูกดิสชาร์จจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ ผ่านทางหม้อแปลงกระแสขนาดเล็ก รุ่น CT-6



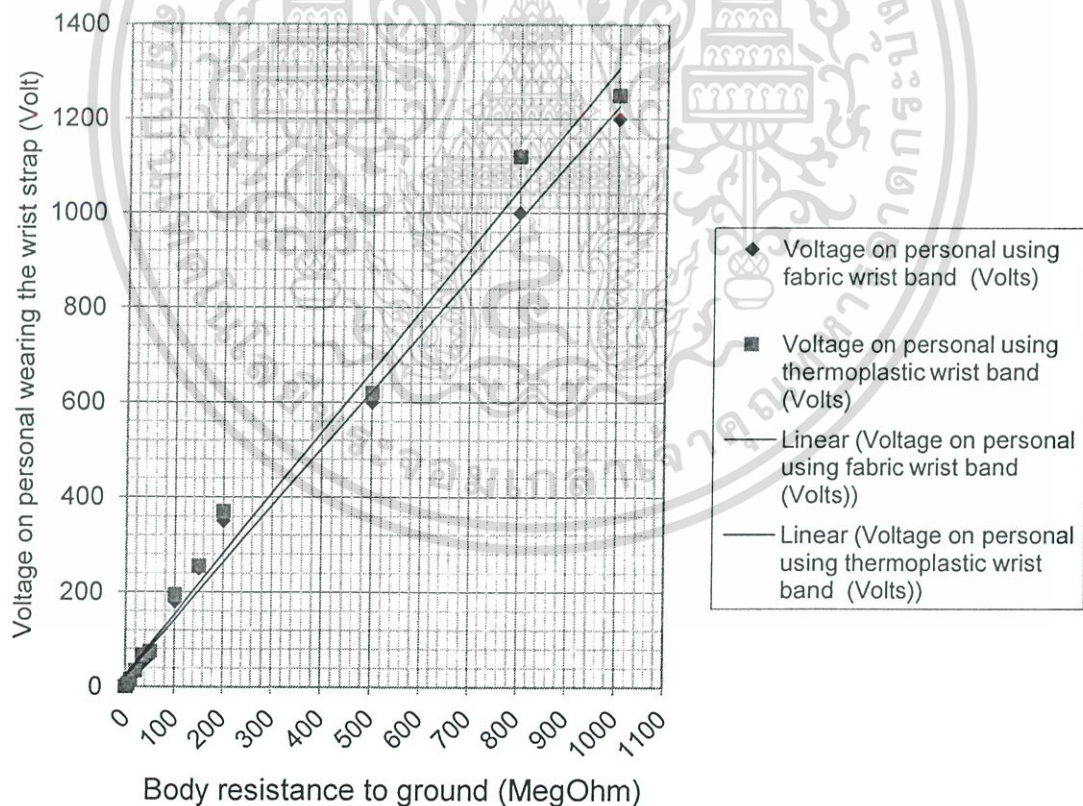
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือ

เป็นการศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายขณะที่ความต้านทานผิวหนังหรือความต้านของสายรัดข้อมือที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจเกิดจากผิวหนังแห้งหรือสายรัดข้อมือเริ่มชำรุด จำลองระบบการควบคุมไฟฟ้าสถิตบนร่างกายของพนักงานในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สายรัดข้อมือเพียงอย่างเดียว โดยไม่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตร่วมด้วย การทดลองนี้จำลองโดยให้ผู้ทดลองใส่สายรัดข้อมือที่อนุกรมกับความต้านทานปรับค่าได้ โดยผู้ทดสอบสวมรองเท้ายางเดินบนแผ่นกระเบื้องยางเพื่อเป็น worst case แล้วทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานปรับค่าได้ ที่ต่ออนุกรมกับสายรัดข้อมือ แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 โดยแกน Y แสดงไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือ เป็นโวลต์ และแกน X แสดงค่าความต้านทานของร่างกายเทียบจุดกราวด์ เป็นเมกโอห์ม

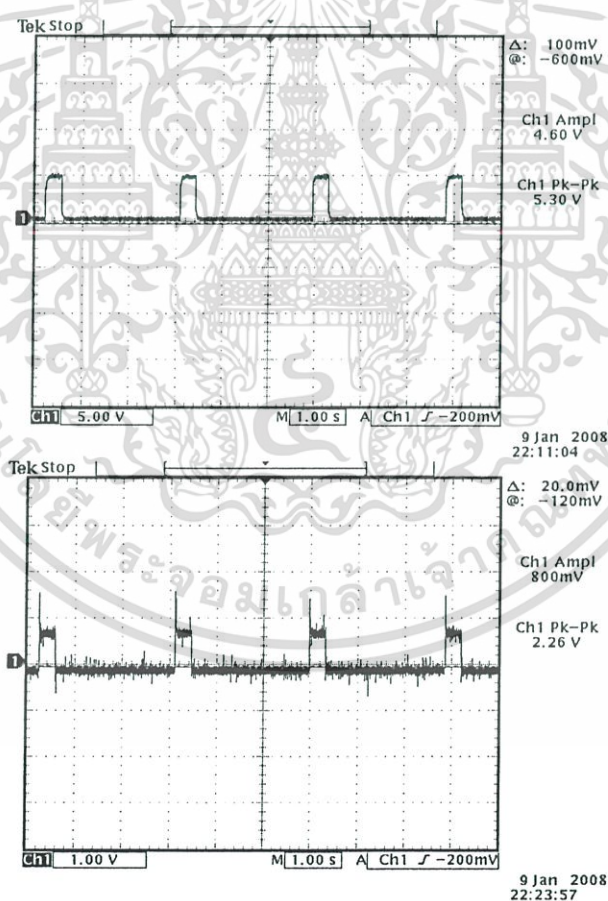


รูปที่ 5.1 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือ ที่ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป

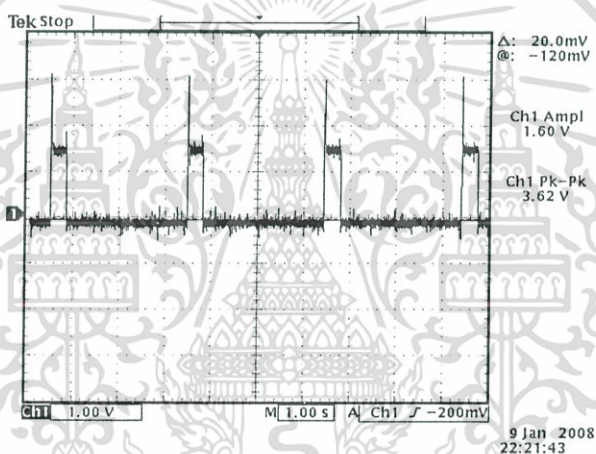
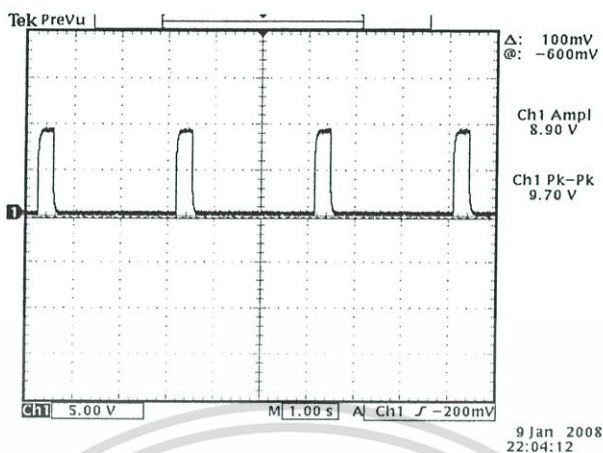
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา

เป็นการศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิดตรวจวัดแบบตลอดเวลา โดยไม่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตร่วมด้วย การทดลองนี้จำลองโดยให้ผู้ทดลองใส่สายรัดข้อมือชนิดดังกล่าว นั่งบนเก้าอี้เพื่อจำลองการนั่งทำงานในสายการผลิต และวัดแรงดันตกคร่อมที่ปลายสายรัดข้อมือขณะยังไม่ได้สวมใส่ และแรงดันที่ปลายนิ้วพนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลาดังกล่าว โดยรูปที่ 5.2 แสดงแรงดันตกคร่อมที่ปลายสายรัดข้อมือขณะยังไม่ได้สวมใส่ และแรงดันที่ปลายนิ้วพนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา ชนิดที่ 1 และรูปที่ 5.3 แสดงแรงดันตกคร่อมที่ปลายสายรัดข้อมือขณะยังไม่ได้สวมใส่ และแรงดันที่ปลายนิ้วพนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา ชนิดที่ 2



รูปที่ 5.2 แรงดันตกคร่อมที่ปลายสายรัดข้อมือขณะยังไม่ได้สวมใส่ และแรงดันที่ปลายนิ้วพนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา ชนิดที่ 1



รูปที่ 5.3 แรงดันตกคร่อมที่ปลายสายรัดข้อมือขณะยังไม่ได้สวมใส่ และแรงดันที่ปลายนิ้วพนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา ชนิดที่ 2

5.3 การศึกษาไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต

เป็นการศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะเดิน เมื่อใช้เฉพาะรองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตชนิดต่าง ๆ ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจำลองระบบการควบคุมไฟฟ้าสถิตบนร่างกายของพนักงานในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิต และอาจไม่สามารถใช้สายรัดข้อมือร่วมได้เนื่องจากลักษณะงานที่ต้องเดินไปมาตลอดเวลา วิธีการทดลองแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2

การออกแบบการทดลอง ใช้การจับคู่ศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากผู้ทดสอบที่สวมรองเท้าที่ใช้ทำการทดลอง 2 ชนิด เดินบนพื้นที่ใช้ทำการทดลองทั้ง 8 ชนิด ที่ติดตั้งอยู่บนแผ่นทดสอบที่ต่อลงกราวด์ บันทึกค่าความต้านทานของพื้นและแรงดันไฟฟ้าสถิตที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนครั้งในการทดลองโดยจับคู่วัสดุ} &= \text{ชนิดของรองเท้าตัวอย่าง} \times \text{ชนิดของพื้นตัวอย่าง} \times \\ &\quad \text{จำนวนพนักงานที่ใช้ทดสอบ} \\ &= 2 \times 8 \times 2 = 32 \text{ ครั้ง} \end{aligned}$$

เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมจริงในการทำงานของพนักงานในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งสภาพแวดล้อมในด้านอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ จึงทำการทดลองนี้ในบริเวณการผลิตจริงและปฏิบัติตามการทดลองทั้งสองท่านก็คือพนักงานในสายการผลิตนั้น โดย ตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดของพื้นและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการทดลอง และตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดของพนักงานที่ร่วมทดลอง

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของพื้นและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการทดลอง

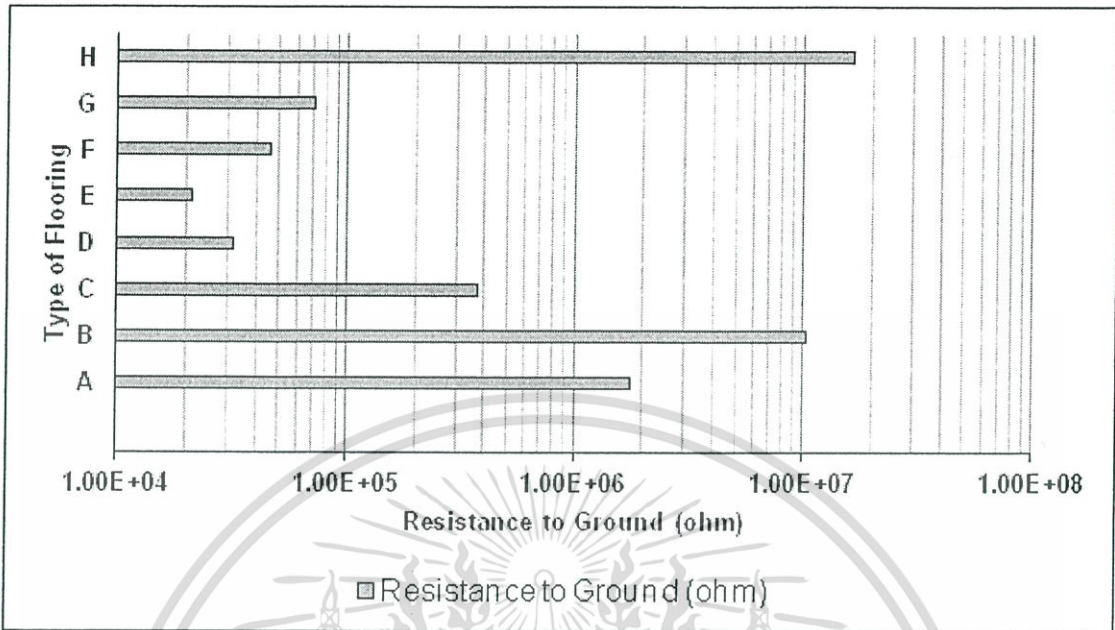
ตัวอย่างวัสดุ	รายละเอียด
พื้น A	แผ่นกระเบื้องยาง ESD PVC Tile แบบดิสซีเปทีฟ หนา 3.2 มิลลิเมตร จาก Supplier 1
พื้น B	แผ่นยางปูพื้นแบบดิสซีเปทีฟ หรือ ESD Mat ชนิด 2 layer ชั้นบนสีเขียว ชั้นล่างสีดำ
พื้น C	แผ่นกระเบื้องยาง ESD PVC Tile แบบตัวนำ หนา 3.2 มิลลิเมตร จาก Supplier 2
พื้น D	แผ่นกระเบื้องยาง ESD PVC Tile แบบตัวนำ หนา 2.0 มิลลิเมตร จาก Supplier 3
พื้น E	แผ่นกระเบื้องยาง ESD PVC Tile แบบตัวนำ หนา 3.0 มิลลิเมตร จาก Supplier 4
พื้น F	แผ่นกระเบื้องยาง ESD PVC Tile แบบตัวนำ หนา 3.2 มิลลิเมตร จาก Supplier 5
พื้น G	แผ่นกระเบื้องยาง ESD PVC Tile แบบตัวนำ หนา 2.0 มิลลิเมตร จาก Supplier 6
พื้น H	แผ่นกระเบื้องยาง ESD PVC Tile แบบดิสซีเปทีฟ หนา 3.2 มิลลิเมตร จาก Supplier 7
รองเท้า A	ESD Shoe, Polyurethane
รองเท้า B	ESD Shoe, PVC

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของพนักงานที่ร่วมทดลอง

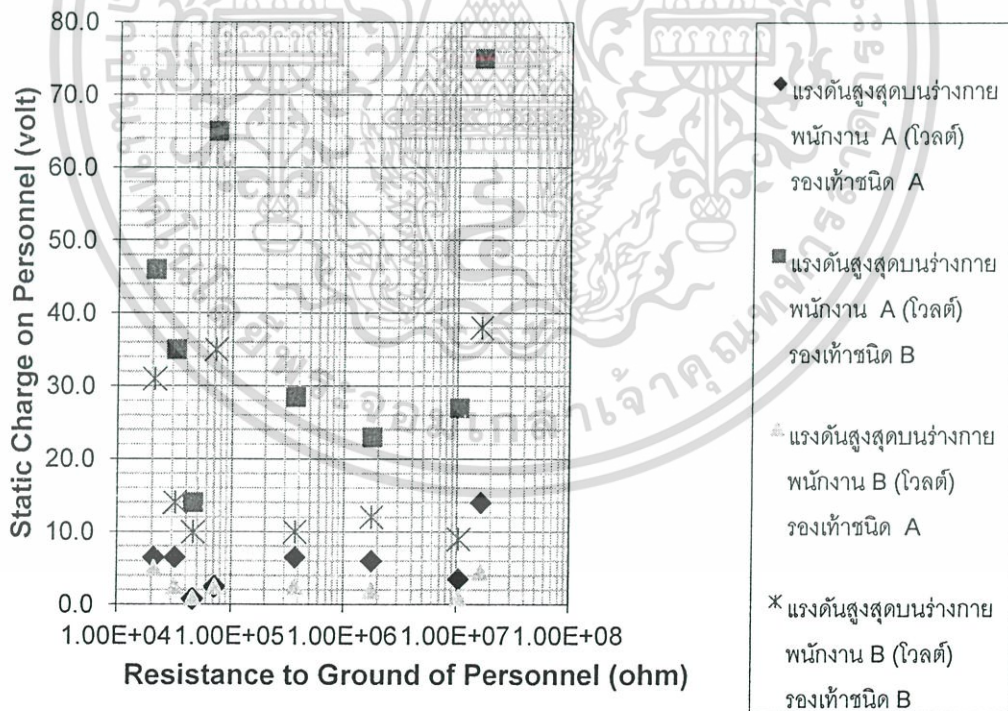
ผู้ทดลอง	รายละเอียด
พนักงาน 1	พนักงานสุภาพสตรี สูง 158 เซนติเมตร น้ำหนัก 51 กิโลกรัม
พนักงาน 2	พนักงานสุภาพสตรี สูง 151 เซนติเมตร น้ำหนัก 45 กิโลกรัม

ความต้านทานของพื้นตัวอย่างทั้ง 8 ชนิด แสดงได้ดังตารางที่ 5.4 โดยพื้นชนิด D มีความต้านทานต่ำที่สุด และพื้นชนิด H มีความต้านทานสูงที่สุด หลังจากนั้น ศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะเดิน โดยให้พนักงานทั้งสองท่าน สวมรองเท้าทั้ง 2 ชนิด และบนพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตทั้ง 8 ชนิด ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ความต้านทานของพื้นตัวอย่างทั้ง 8 ชนิด



รูปที่ 5.5 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานขนาดเล็กผ่านพื้นผิวดิสซีเปทีฟ

จากการเลือกใช้พื้นผิวดิสซีเปทีฟปุ้ติ้เพื่อจุดประสงค์ในการถ่ายเทหรือระบายไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานลงสู่กราวด์นั้น การวัดความต้านทานของพื้นผิวดังกล่าวที่กำหนดให้ใช้เครื่องมือวัดความต้านทานร่วมกับแท่งอิเล็กโทรดน้ำหนักรวม 2.27 กิโลกรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตรนั้น ถ้าเปรียบเทียบกับน้ำหนักและขนาดของแท่งอิเล็กโทรดดังกล่าว กับน้ำหนักของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์วงจรรวมขนาดเล็กที่อาจมีน้ำหนักเพียง 1 กรัมหรือน้อยกว่านั้น ความต้านทานพื้นผิวที่เกิดจากความต้านทานที่ผิวสัมผัสอาจมีค่าสูงชัน และมากจนไฟฟ้าสถิตไม่สามารถไหลผ่านพื้นผิวดังกล่าวลงสู่กราวด์ตามที่ต้องการได้

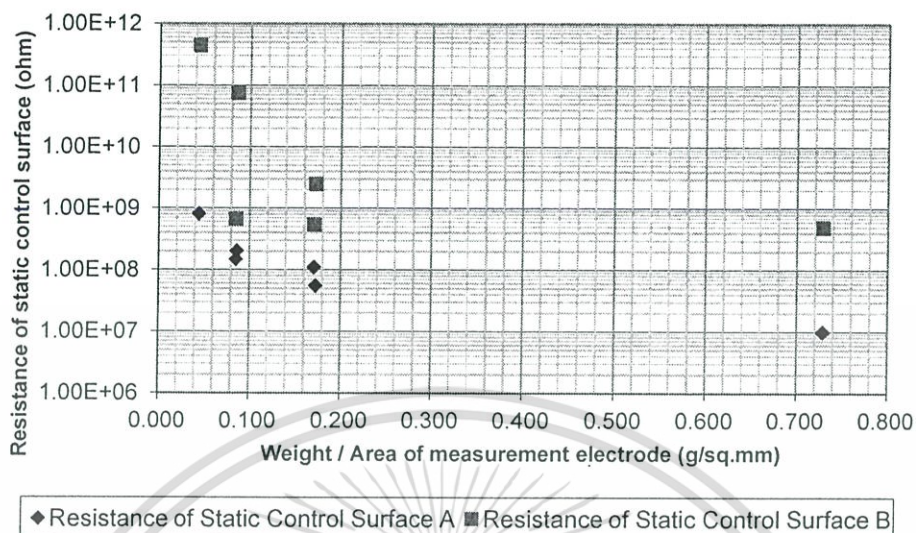
การทดสอบใช้การจำลองขนาดของชิ้นงานที่เล็กและเบาลง ด้วยขนาดของอิเล็กโทรดที่เล็กและเบาตามลำดับ จากแท่งทรงกลมที่เล็กลงจนกระทั่งมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เพียง 5 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักเพียง 1.1 กรัม เพื่อศึกษาแนวโน้มของความต้านทานดังกล่าว บนพื้นดิสซีเปทีฟปุ้ติ้ 2 ชนิด ชนิดแรกมีความต้านทานตามข้อกำหนดการวัดมาตรฐานที่ 10 เมกโอห์ม ชนิดที่สองมีความต้านทานตามข้อกำหนดการวัดมาตรฐานที่ 500 เมกโอห์ม

ผลการทดลอง เมื่อขนาดของอิเล็กโทรดที่เล็กและเบาตามลำดับ แสดงในตารางที่ 5.3 โดยแสดงขนาดและน้ำหนักของแท่งอิเล็กโทรด และค่าความต้านทานของพื้นผิว 2 ชนิด ที่วัดจากขนาดของแท่งอิเล็กโทรดดังกล่าว รูปที่ 5.6 แสดงกราฟค่าความต้านทานของพื้นผิว 2 ชนิด ที่วัดจากขนาดของแท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กลง

ตารางที่ 5.3 ขนาดของแท่งอิเล็กโทรด และค่าความต้านทานของพื้นผิว 2 ชนิด ที่วัดจากขนาดของแท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดและน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไป

Electrode size (mm) & Diameter (mm)	63mm dia, ESD S4.1	50mm dia, 20mm thick	50mm dia, 10mm thick	20x20x20	10x10x10	5x5x5
Area (sq.mm)	3115.67	1962.50	1962.50	400.00	100.00	25.00
Weight (g)	2270	335	167	69	8.6	1.1
Weight/Area (g)/sqmm)	0.729	0.171	0.085	0.173	0.086	0.044
Resistance of Static Control Surface A	1.00E+07	1.12E+08	1.50E+08	5.60E+07	2.05E+08	8.25E+08
Resistance of Static Control Surface B	5.00E+08	5.50E+08	6.80E+08	2.50E+09	7.50E+10	4.50E+11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานของพื้นผิว 2 ชนิด ที่วัดจากขนาดของแท่งอิเล็กโทรดที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไป

5.5 การศึกษาการตรวจวัดความต้านทานของระบบกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือ

การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบกราวด์ในปัจจุบันยังคงใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จึงทดลองใช้เครื่องมือวัดดังกล่าว วัดเทียบกับอิมพีแดนซ์มิเตอร์ที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ เพื่อให้สามารถวัดความต้านทานขณะมีกระแสไหลในสาย หรือมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงภายในสายได้ เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลที่วัดได้ และเป็นแนวทางของอุตสาหกรรมในการเลือกใช้เครื่องมือวัดที่เหมาะสมต่อไป โดยตารางที่ 5.4 แสดงค่าความต้านทานของตัวต้านทาน 10 โอห์ม ที่ต่อร่วมกับแหล่งกำเนิดขนาด 9 โวลต์ ออกแบบให้มีกระแส 9 มิลลิแอมป์ไหลผ่านตัวต้านทานดังกล่าว และใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์และอิมพีแดนซ์มิเตอร์ที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะวัดค่าความต้านทานที่ตัวต้านทานนั้น

ตารางที่ 5.4 ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน 10 โอห์ม ที่มีกระแส 9 มิลลิแอมป์ไหลผ่าน โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์และอิมพีแดนซ์มิเตอร์ที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ

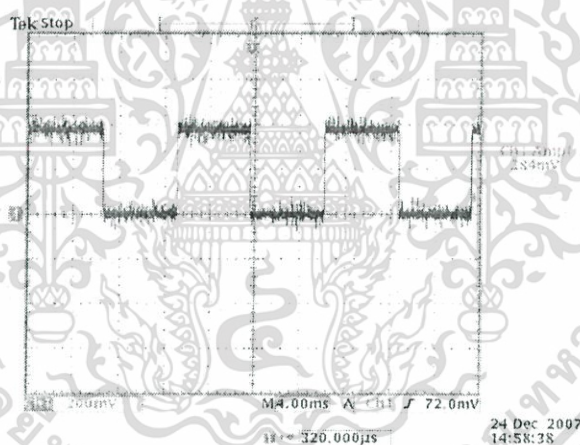
Type of measurement	10 ohm resistor with 9mA current	
	Red (+) Black (-)	Red (-) Black (+)
Digital Multimeter (ohm)	- 68 ohm	- 68 ohm
Impedance Meter (ESD S6.1 Standard)	10 ohm	10 ohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

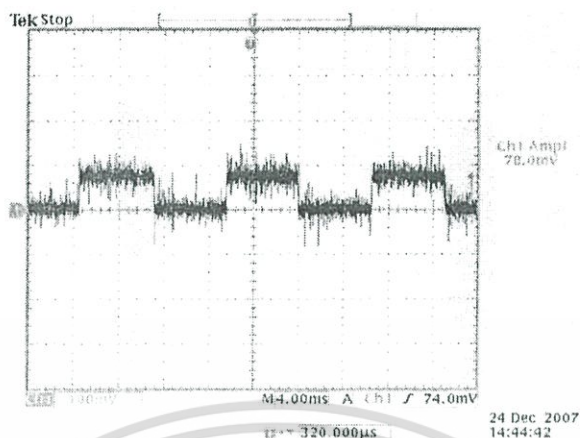
การเลือกใช้การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบกราวด์ของเครื่องจักรด้วยวิธีการหรือเครื่องมือวัดที่เหมาะสมที่สามารถวัดความต้านทานขณะมีกระแสไหลในสายได้นั้น จะทำให้สามารถที่จะอ่านค่าความต้านทานได้ถูกต้อง และนำไปออกแบบการวัดและตรวจสอบการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา (Machine Ground Monitor) ได้ และสามารถที่จะกำหนดค่าความต้านทานสูงสุดได้ เช่น 1 โอห์ม 5 โอห์ม หรือ 10 โอห์ม โดยแสดงผลความผิดปกติเนื่องจากความต้านทานสูงเกิน ด้วยไฟแสดงผลเสียงเตือน หรือหยุดการทำงานของเครื่องจักรทันที เป็นต้น

หลักการที่สำคัญเช่นเดียวกับการออกแบบการวัดสายรัศมีแบบตลอดเวลา ก็คือ แรงดันในการวัด ที่ต้องไม่เป็นอันตรายต่อชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักรดังกล่าว

จากความต้องการนี้ รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างการออกแบบการตรวจสอบการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา ที่ใช้แรงดันในการวัดสูงสุดที่ 400 มิลลิโวลต์ ที่ใช้กับงานทั่วไป แต่อาจสูงเกินไปสำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิดที่มีความไวต่อไฟฟ้าสถิตในระดับต่ำมาก อาทิเช่น ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสค์ และรูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างการออกแบบการตรวจสอบการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา ที่ใช้แรงดันในการวัดสูงสุดเพียง 70 มิลลิโวลต์ ที่แรงดันในการวัดจะไม่เป็นอันตรายต่อชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักรนั้นๆ



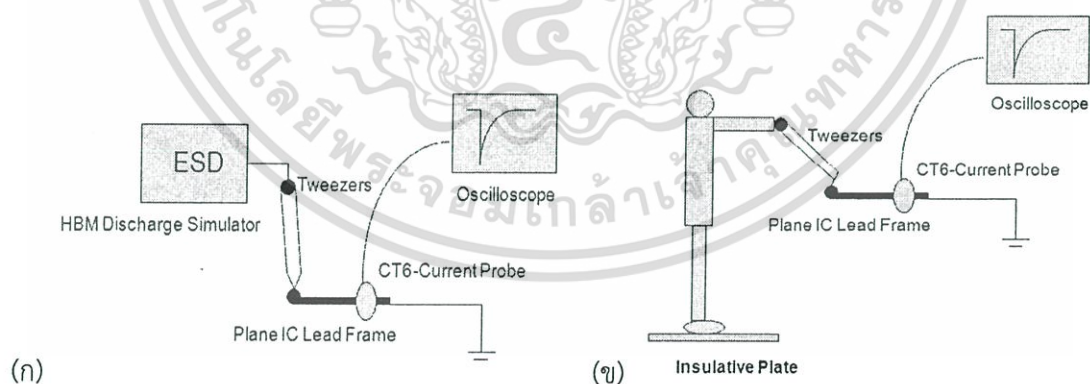
รูปที่ 5.7 ตัวอย่างการออกแบบการตรวจสอบการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา ที่ใช้แรงดันในการวัดสูงสุดที่ 400 มิลลิโวลต์



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการออกแบบการตรวจสอบการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรแบบตลอดเวลา ที่ใช้แรงดันในการวัดสูงสุดเพียง 70 มิลลิโวลต์ ที่แรงดันในการวัดไม่เป็นอันตรายต่อชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักร

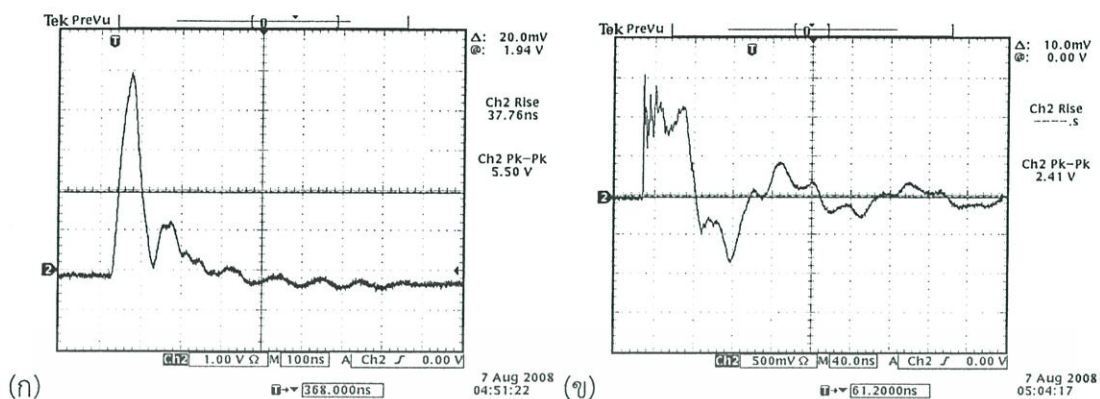
5.6 การศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านคีมจับถือหรือ Tweezers

การศึกษการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านอุปกรณ์จับถือชิ้นงานที่เป็น tweezers โดยวัดกระแสที่ถูกดิสชาร์จ ผ่านทางหม้อแปลงกระแสขนาดเล็ก รุ่น CT-6 แสดงได้ในรูปที่ รูปที่ 5.9 โดยทดลองดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจาก HBM Discharge Simulator ผ่าน tweezers และจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ และรูปที่ 5.10 แสดงลักษณะรูปคลื่นจากการทดลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตดังกล่าว



รูปที่ 5.9 (ก) การทดลองการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจาก HBM Discharge Simulator ผ่าน tweezers และ (ข) จากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



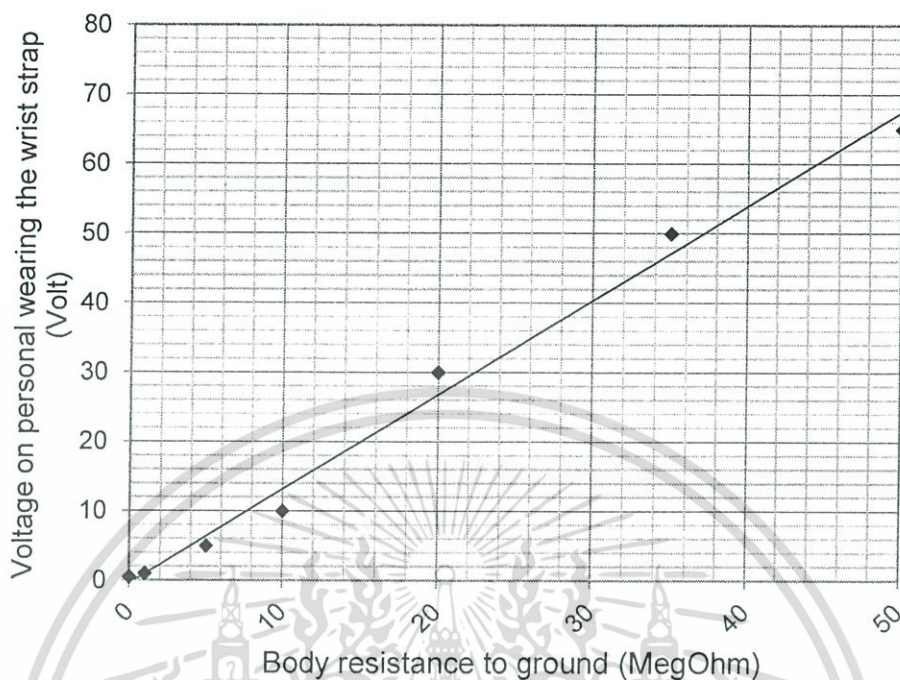
รูปที่ 5.10 ลักษณะรูปคลื่นจากการทดลองการดีสชาร์จไฟฟ้าสถิตจาก HBM Discharge Simulator (ก) และจากร่างกายผ่านทาง tweezers (ข) ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์

5.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.7.1 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือแบบต่อลงกราวด์โดยตรง

จากรูปที่ 5.1 การเปลี่ยนค่าความต้านทานปรับค่าได้ที่ต่อร่วมกับสายรัดข้อมือเพื่อจำลองแทนค่าความต้านทานของร่างกายเมื่อเทียบกับกราวด์ที่เปลี่ยนแปลงนั้น ที่ความต้านทานของร่างกายที่สูงขึ้น ร่างกายจะมีประจุสะสมสูงขึ้น โดยสามารถวัดระดับแรงดันบนร่างกายได้สูงกว่าที่ค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากลักษณะลดลงของการถ่ายเทประจุจากตัวนำ ตามสมการ $V = V_0 \cdot \text{Exp}(-t/RC)$ ซึ่งแสดงได้ว่าถ้าค่าความจุของร่างกายและแรงดันที่เกิดขณะร่างกายเคลื่อนไหวยังมีค่าคงที่ ค่าความต้านทานที่ต่อลงกราวด์ที่มีค่าสูงขึ้น ร่างกายจะใช้เวลาในการถ่ายเทประจุนานขึ้น จึงสามารถวัดแรงดันสะสมบนร่างกายได้สูงกว่าที่ค่าความต้านทานต่ำ

เมื่อนำรูปที่ 5.1 มาขยายให้ละเอียดในย่านความต้านทานต่ำ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 นั้น ผู้ใช้งานสามารถใช้ระดับแรงดัน Human Body Model ที่ชิ้นงานสามารถทนได้ มากำหนดออกแบบค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ของร่างกายพนักงานและระบบสายรัดข้อมือ ตัวอย่างเช่น ถ้าชิ้นงานมีความไวต่อไฟฟ้าสถิตที่ 10 โวลต์ ในแกน Y ลากผ่านจุดตัดของเส้นที่เกิดจากการทดลอง มาที่แกน X ความต้านทานร่างกายที่สูงที่สุดที่ยอมรับได้คือ 7 เมกโอห์ม การตั้งค่าความต้านทานสูงสุดของ wrist strap tester จึงสามารถอ้างอิงจากค่านี้ได้ เป็นต้น



รูปที่ 5.11 จากผลการทดลอง ถ้าชิ้นงานมีความไวต่อไฟฟ้าสถิตที่ 10 โวลต์ ความต้านทานร่างกายที่สูงสุดที่ยอมรับได้คือ 7 เมกโอห์ม

ในลักษณะของชิ้นงานแบบเดียวกัน แต่ผลิตในโรงงานที่มีที่ตั้งแตกต่างกัน อาทิเช่นประเทศที่มีอากาศหนาวและมีความชื้นต่ำ การเกิดไฟฟ้าสถิตจากวัสดุต่างๆ รวมทั้งไฟฟ้าสถิตบนร่างกายจากการเดินก็จะสูงกว่าประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น การควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนร่างกายก็จะมีผลแตกต่างกัน แต่ยังคงอยู่บนหลักการเดิม และใช้การทดลองดังกล่าวในการวิเคราะห์ได้ [13]

จากการทดลอง การที่สายรัดข้อมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ใช้ค่าความต้านทาน 1 เมกโอห์มอนุกรมอยู่ภายใน ซึ่งนอกจากจุดประสงค์ในการป้องกันผู้สวมสายรัดข้อมือจากอันตรายของกระแสไฟฟ้ารั่วจากระบบไฟฟ้า (110 โวลต์/220 โวลต์) ขณะที่ผู้สวมใส่สายต่อลงดิน โดยจำกัดกระแสไฟฟ้ารั่วให้น้อยกว่าระดับที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์แล้ว จะเห็นได้ว่าแรงดันบนร่างกายที่วัดได้ขณะความต้านทานมีค่า 1 เมกโอห์ม มีค่าประมาณ 1 โวลต์ ซึ่งน้อยมากจนยอมรับได้ ไม่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์หรือวงจรที่มีความไวต่อการดิสชาร์จของไฟฟ้าสถิต (ESD Sensitive Devices : ESDs)

5.7.2 ไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายพนักงานที่สวมสายรัดข้อมือแบบตรวจวัดตลอดเวลา

จากผลศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตสะสมบนร่างกายขณะใช้สายรัดข้อมือชนิดตรวจวัดตลอดเวลาจากรูปที่ 5.2 และ 5.3 นั้น ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้นอกจากรูปแบบการใช้งานแล้ว สิ่งที่สำคัญที่สุดคือแรงดันตกคร่อมที่ร่างกายและปลายนิ้วพนักงานขณะสวมใส่สายรัดข้อมือแบบดังกล่าวซึ่ง

อาจส่งผลต่อชิ้นงานได้ ควรทดสอบและเลือกใช้ตั้งการทดลองที่น่าเสนอ เพื่อให้มั่นใจว่า แรงดันที่ร่างกายพนักงานจะต้องน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสถิตที่ชิ้นงานนั้นสามารถทนได้

สำหรับการออกแบบระบบสายรัดข้อมือชนิดนี้ ควรใช้แรงดันในการตรวจวัดความต้านทานของร่างกายให้น้อยที่สุด เพื่อให้เกิดแรงดันตกคร่อมหรือแรงดันเหนี่ยวนำที่ร่างกายพนักงานน้อยที่สุดเช่นกัน

5.7.3 ไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการเลือกใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตชนิดต่างๆ

จากผลการศึกษาในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ที่แสดงปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายที่เกิดจากการเลือกใช้รองเท้าทั้ง 2 ชนิด และพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตชนิดต่าง ๆ ทั้ง 8 ชนิด ซึ่งจำลองระบบการควบคุมไฟฟ้าสถิตบนร่างกายของพนักงานในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้รองเท้าและพื้นควบคุมไฟฟ้าสถิตนั้น ปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายไม่มีความสัมพันธ์กับความต้านทานของพื้น โดยการเดินบนพื้นชนิด D ซึ่งเป็นพื้นที่มีความต้านทานต่ำที่สุด ที่ 0.021 เมกโอห์ม ควรจะมีการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตลงกราวด์ดีที่สุด และมีปริมาณประจุสะสมบนร่างกายน้อยที่สุด หรือพื้นชนิด H ที่มีความต้านทานสูงสุด ที่ 160 เมกโอห์ม ควรจะมีปริมาณประจุสะสมบนร่างกายสูงที่สุด แต่จากผลการทดลอง พื้นชนิด F ให้ปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายต่ำที่สุด ที่ 0.8 โวลต์ และพื้นชนิด A ที่มีความต้านทานสูงเป็นลำดับที่สอง ซึ่งให้ปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายต่ำ ที่ 6 โวลต์ เช่นกัน

ดังนั้น พื้นชนิดที่มีความต้านทานต่ำ ถึงแม้จะมีความสามารถในการถ่ายเทประจุดี แต่ความสามารถในการเกิดประจุหรือ tribocharge และปริมาณประจุสะสมหรือ charge accumulation ไม่ได้มีค่าต่ำเช่นเดียวกับแนวโน้มการทดลองของสายรัดข้อมือ ดังรูปที่ 5.1 พื้นชนิดที่มีความต้านทานต่ำมิได้ส่งผลให้เกิดแรงดันบนร่างกายในระดับต่ำเสมอไป ดังนั้น ค่าความต้านทานของพื้นจึงไม่ใช่ปัจจัยหลักในการพิจารณาคุณสมบัติในการควบคุมไฟฟ้าสถิตของพื้น การทดลองวัดระดับแรงดันที่เกิดขึ้นจริงบนร่างกายของพื้นและรองเท้าในงานวิจัยนี้ จึงเป็นแนวทางการทดสอบที่เหมาะสม เพื่อเลือกใช้ชนิดของพื้นควบคุมไปกับการพิจารณาค่าความต้านทานของพื้นนั้น ๆ

5.7.4 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตจากชิ้นงานขนาดเล็กผ่านพื้นผิวดิสซีเปทีฟ

จากตารางที่ 5.3 ที่จำลองขนาดของชิ้นงานที่เล็กและเบาด้วยขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่เล็กและเบาตามลำดับ จากแห่งทรงกลมที่เล็กลงจนกระทั่งมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เพียง 5 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักเพียง 1.1 กรัม เพื่อศึกษาแนวโน้มของความต้านทานของพื้นผิวดังกล่าว โดยใช้พื้นดิสซีเปทีฟปูโต๊ะ 2 ชนิด ที่ 10 เมกโอห์ม 500 เมกโอห์ม

ผลการทดลองเมื่อขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่เล็กและเบาตามลำดับนั้น ค่าความต้านทานของพื้นผิว 2 ชนิด ที่วัดจากขนาดของแห่งอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะพื้นปูโต๊ะชนิด B ที่ให้ค่าความต้านทานเกินข้อกำหนดของย่านดิสซีเปทีฟ ที่กำหนดไว้สูงสุดไม่เกิน 1×10^9 โอห์ม ที่ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่น้ำหนักต่ำกว่า 8.6 กรัม วัดค่าความต้านทานได้ 7.5×10^{10} โอห์ม และที่อิเล็กทรอนิกส์น้ำหนัก 1.1 กรัม วัดค่าความต้านทานได้ 4.50×10^{11} โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งประจุไฟฟ้าสถิตอาจไม่สามารถระบายหรือถ่ายเทจากชิ้นงานลงสู่พื้นผิวและลงสู่กราวด์ตามที่ต้องการหรือตามที่ต้องการที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและเบามาก อาจต้องออกแบบพื้นผิวสำหรับถ่ายเทประจุโดยเฉพาะ และอาจต้องมีความต้านทานที่ต่ำลง เพื่อยังคงความสามารถในการถ่ายเทประจุสำหรับชิ้นงานดังกล่าว โดยเฉพาะ

5.7.5 การศึกษาการตรวจวัดความต้านทานของระบบกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือ

การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบกราวด์ของเครื่องมือเครื่องจักรในปัจจุบันที่ยังคงใช้ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ให้ค่าความต้านทานที่คลาดเคลื่อนขณะมีกระแสไหลในสาย และในผลการทดลอง ยังให้ค่าความต้านทานเป็นลบ ที่ -68 โอห์ม เปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์มิเตอร์ที่ถูกรอกแบบมาโดยเฉพาะที่สามารถวัดความต้านทานขณะมีกระแสไหลในสายหรือมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้ ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่ 10 โอห์มเท่าเดิม ดังนั้นการทดสอบระบบกราวด์ขณะเครื่องจักรทำงาน จึงควรใช้ เครื่องมือวัดที่เหมาะสม ดังการทดลองที่นำเสนอ

การต่อลงกราวด์ที่ไม่เหมาะสมและไม่คำนึงถึงความต้านทานและการตรวจสอบที่ถูกต้องจาก ระบบไฟกระแสดสลับ เกิดได้ดังรูปที่ 5.12 ที่แสดงการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือที่แตกต่าง กัน 2 กรณี สายกราวด์ที่มีความยาวถูกขดเป็นวงกลม หรือสายกราวด์ที่อาจไม่ถูกขดเป็นวงกลม แต่มีความยาวมากเกินไป



รูปที่ 5.12 แสดงการต่อลงกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือที่แตกต่างกัน 2 กรณี

ขณะความถี่สูง สายกราวด์ที่มีความยาวถูกขดเป็นวงกลมซึ่งมีแกนเป็นอากาศ จะมีความเหนี่ยวนำแสดงได้ดังสมการ 5.1 [14]

$$L = (r^2 \times n^2) / (9r + 10d) \quad (5.1)$$

โดยค่า L เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี (μH), r เป็นรัศมีของแกนวงกลมที่มีหน่วยเป็นนิ้ว, N เป็นจำนวนรอบของขดลวด, d เป็นความยาวของขดลวดมีหน่วยเป็นนิ้ว ถ้าสายกราวด์ถูกม้วนให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 นิ้ว จำนวน 5 รอบ มีความยาว 0.75 นิ้ว ความเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ 12.2 μH และที่ความถี่ 100 MHz ค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ที่ขดเป็นวงกลมดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 7.661 กิโลโอห์ม ตามสมการที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$XL = 2\pi fL \quad (5.2)$$

โดย XL เป็นค่าอิมพีแดนซ์, f เป็นค่าความถี่ และ L เป็นความเหนี่ยวนำ ที่กระแสไหลผ่านขนาด 1 มิลลิแอมป์ และความถี่ที่ 100 MHz จะเกิดแรงดันตกคร่อมขนาด 7.661 โวลต์ ตามสมการที่ 5.3

$$V = I \cdot XL \quad (5.3)$$

โดย V เป็นแรงดันตกคร่อม, I เป็นกระแสที่ไหลผ่าน และ XL คือค่าอิมพีแดนซ์ แสดงว่าแรงดันตกคร่อมที่เครื่องมือดังกล่าว มีค่า 7.661 โวลต์เมื่อเทียบกับกราวด์

ในทำนองเดียวกัน ถ้าสายกราวด์ไม่ถูกขดเป็นวงกลม แต่มีความยาวมากเกินไป ความเหนี่ยวนำที่เกิดขณะที่มีความถี่สูงจะสามารถคำนวณได้โดย

$$L = 0.002d [\ln(2d/r) - 1] \quad (5.4)$$

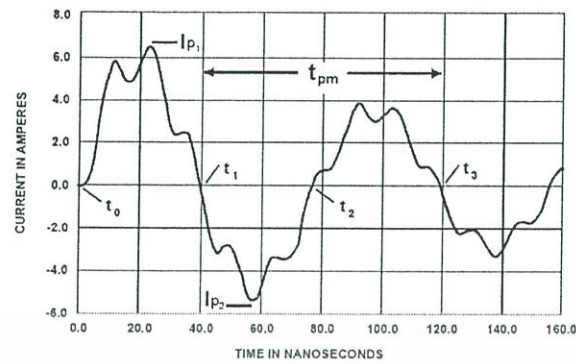
โดย L เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี่ (μH), r เป็นรัศมีของสายเป็นเซนติเมตร, d เป็นความยาวของสายเป็นเซนติเมตร

สายกราวด์ที่มีความยาว 10 เมตร ขนาดสายที่เกจ 12 จะมีค่าความเหนี่ยวนำตามสมการที่ 5.4 ขนาด 17.36 ไมโครเฮนรี่ ที่กระแสไหลผ่านขนาดเท่ากันที่ 1 มิลลิแอมป์ และความถี่ 100 MHz จะเกิดแรงดันตกคร่อมเนื่องจากสายกราวด์ที่เครื่องมือดังกล่าว ขนาด 10.9 โวลต์

ซึ่งทั้งสองกรณี ระบบกราวด์ผ่านการตรวจสอบตามมาตรฐาน แต่อาจเกิดแรงดันตกคร่อมที่อาจทำให้เครื่องมือทำงานผิดพลาด หรือดิสชาร์จไปยังชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเสียหายได้

5.7.6 การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านคีมหยิบจับ หรือ tweezers

จากการศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตผ่านอุปกรณ์จับถือชิ้นงานที่เป็น tweezers โดยการใช้การดิสชาร์จจาก HBM Discharge Simulator ผ่าน tweezers และจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์นั้น ลักษณะรูปคลื่นจากการทดสอบการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากร่างกายผ่านทาง tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์จะมีลักษณะคล้ายกับการถ่ายเทประจุจากเครื่องจักร ดังนั้น การพิจารณาความไวหรือความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตของชิ้นงาน ผ่านการจับถือด้วย tweezers จึงควรต้องพิจารณาด้วยความไวต่อไฟฟ้าสถิตของชิ้นงานตามแบบจำลองเครื่องจักร หรือ machine model มิใช่แบบจำลองร่างกาย หรือ human body model อีกต่อไป



รูปที่ 5.13 ลักษณะรูปคลื่นของการดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจากพนักงานที่หยิบชิ้นงานด้วย tweezers ลงสู่ขาของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีลักษณะเป็น machine model [15]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

หลักการสำคัญในการควบคุมและป้องกันความเสียหายอันจะเกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิตต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ก็คือ การถ่ายเทหรือระบายไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นดังกล่าว ลงสู่ระบบกราวด์อย่างเหมาะสม ก่อนที่ไฟฟ้าสถิตจะดิสชาร์จสู่ชิ้นงาน หรือลดลงอยู่ในระดับที่ต่ำและไม่เป็นอันตรายต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ถึงแม้จะเกิดการดิสชาร์จก็ตาม จากการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนร่างกายพนักงานที่มีการใช้สายรัดข้อมือและรองเท้าควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสม การถ่ายเทไฟฟ้าสถิตสำหรับการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมากลงกราวด์โดยพิจารณาถึงความต้านทานผิวสัมผัสและความสามารถในการถ่ายเทประจุขณะวางชิ้นส่วนนั้นบนแผ่นปูโต๊ะแบบดิสซิเปทีฟ การต่อกราวด์ของเครื่องจักรหรือเครื่องมือ และการทดสอบระบบกราวด์โดยคำนึงถึงกระแสที่ไหลในระบบกราวด์ ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันตกคร่อมในวงจรที่เกิดจากความต้านทานดังกล่าวนั้น ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นำไปใช้ในการออกแบบการควบคุมไฟฟ้าสถิตที่ถูกต้องและเหมาะสม โดยเฉพาะในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีความไวต่อไฟฟ้าสถิตอยู่ในระดับต่ำมาก ซึ่งการควบคุมไฟฟ้าสถิตและการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุแต่ละชนิดนั้น บุคลากรและวิศวกรต้องทุ่มเทและใช้เวลาทั้งหมด เพื่อแก้ไขปัญหาด้านนี้ โดยยังขาดมาตรฐานอ้างอิงเพื่อนำไปออกแบบการควบคุมไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อนุสรณ์ จักรแก้ว. 2545. “การศึกษาการลดไฟฟ้าสถิตบนร่างกายที่ผลต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์”.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ESD Association, “Electrostatic Discharge (ESD) Technology Roadmap”. 2005
- [3] ESD Association, “Fundamentals of Electrostatic Discharge, Part Five-Device Sensitivity and Testing”. 2001
- [4] ESD Association, ESD TR20.20-2008 Handbook for the Development of an Electrostatic Discharge Control Program for the Protection of Electronic Parts, Assemblies and Equipment. 2008
- [5] ESD Association, ANSI/ESD S7.1-2005. For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items, Floor Materials Characterization of Materials, 2005
- [6] ESD Association, ANSI/ESD S541-2008. For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items, Packaging Materials for ESD Sensitive Items, 2008
- [7] Donald Yenni, “Basic Electrical Considerations in Design of a Static-safe Work Environment”, Nepcon/West Conference, Anaheim, California, USA, 1971
- [8] ESD Association, “Fundamentals of Electrostatic Discharge, Part Five : Device Sensitivity and Testing”, 2001
- [9] ESD Association, ESD TR1.0-01-01 (TR12-01), Survey of Constant (Continuous) Monitors for Wrist Straps, ESD Association.
- [10] ESD Association, ANSI/ESD S20.20-2007, For the Development of an Electrostatic Discharge Control Program for – Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices), 2007
- [11] ESD Association, ANSI/ESD S4.1-2006. For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items, Worksurfaces – Resistance Measurements, 2006
- [12] Anusorn Chakkaew, Wisut Titiroongruang. “Electrostatic Control and New Device Handling Consideration for MEMS Manufacturing Process”, Applied Materials and Electronics Engineering, Part 2, Vol 378-378, pp 659-662
- [13] อนุสรณ์ จักรแก้ว, ศพพงศ์ สุमानนท์, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายที่มีผลจากความต้านทานและความชื้นสัมพัทธ์”, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38, พ.ศ. 2547, หน้า 374-381

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] Vladimir Kraz, Credence Technologies, and J. E. Patrick Gagnon, Texas Instruments. "How Good is Your Ground". EE-Evaluation Engineering. January 2002
- [15] ESD Association, ANSI/ESD S5.2-2009. For electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Machine Model (MM) – Component Level, 2009



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

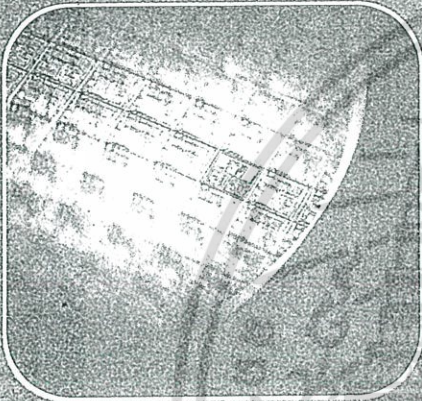
บทความทางวิชาการเรื่อง Electrostatic Control and The Need of Feedback Control Ionization in Critical Environment of MEMS Manufacturing Process ที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมทางวิชาการ China Semiconductor Technology International Conference, CSTIC 2010, วันที่ 18-19 มีนาคม พ.ศ. 2553 ที่ Shanghai ประเทศจีน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

March 18-19, 2010

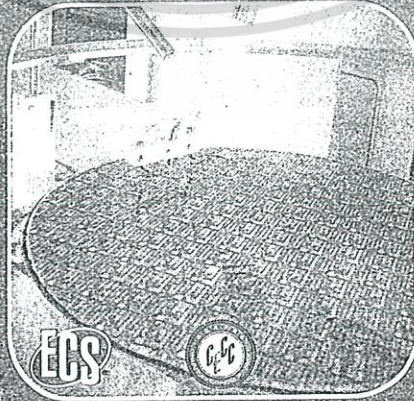
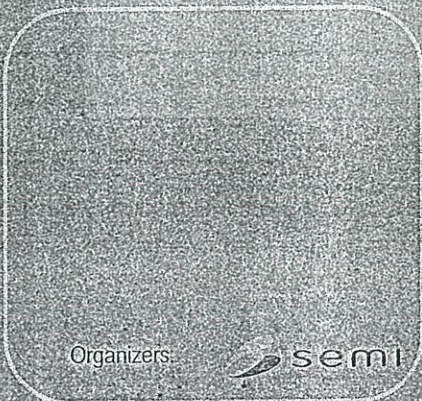
Plaza Royale Oriental Shanghai, China
<http://Semiconchina.semi.org/cstic>



CSTIC 2010

中国国际半导体技术大会

China Semiconductor Technology International Conference



Organizers:  semi

Co-organizer: China's High-Tech Expert Committee (CHTEC)

Co-sponsors:  IEEE



 CEMIA





中国国际半导体技术大会

China Semiconductor Technology International Conference

March 18-19, 2010
Plaza Royale Oriental Shanghai, China

Organizers:



Co-organizer: China's High-Tech Expert Committee (CHTEC)

Co-sponsors:



Platinum Sponsors: **KLA Tencor**

Silver Sponsors:



Bronze Sponsors:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrostatic Control and the Need of Feedback Control Ionization in Critical Environment of MEMS Manufacturing Process

Anusorn Chakkaew^{a,b}, Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang^a

a. Electronic Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.

b. Customer Technical Center, 3M Thailand Limited, Bangkok 10520, Thailand

Biography

Anusorn Chakkaew is a Technical Manager, Customer Technical Center of 3M Thailand Limited, and he is now a researcher of Electronic Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). He is a NARTE Certified ESD Control Engineer, International Association of Radio, Telecommunications and Electromagnetics (iNARTE), and a member of ESD Association. He received Master of Engineering in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

Abstract

This paper describes new electrostatic control countermeasures and solutions for critical electrostatic control environment that can be implemented in MEMS manufacturing, especially in MEMS's wafer handling that needs low electrostatic voltage. This includes ESD event measurement, machine grounding verification, and low ion imbalance ionization to support current and future needs of the MEMS.

Proposed countermeasures are ESD event monitor with electrostatic voltage using a single antenna. Grounding measurement that designed to ignore high-frequency components and measure only the required parameter. These two will help front-end engineer to qualify tools and identify critical process and make the electrostatic issues manageable. Furthermore, the electrostatic field can also be minimized by sub-1 volt ionizer controller that discard initial imbalance, short-term and long-term drift. This brings the balance from 25 volt to sub-1 volt within few second to prevent charge built up in MEMS wafer handling process.

Solutions for Extending Capillary Life Correlated to Build-Up during Wire Bonding

Tomer Levinson^a, Oleg Billert^a

a Kulicke & Soffa Bonding Tools, Yokneam Elite 20692, ISRAEL

Biography

Tomer Levinson has been an application and process engineer in Bonding Tool Israel, a subsidiary of Kulicke & Soffa Industries, Inc, since 2005. He earned his B.Sc. Degree in Mechanical Engineering and continues studying M.Sc Degree in Materials Engineering both at the Technion - Israel Institute of Technology. During his studies, Tomer Levinson continues to developed new capillary designs, measurements and analysis tools for wire bonding process and responses.

Abstract

In recent years, many assembly houses have been actively seeking cost reduction techniques. Due to the contribution of consumables to the total cost of the wire bonding process, focus has turned to capillary life-span as a major factor in the qualification process. To answer the assembly industry's need for cost reductions, K&S Bonding Tools has designed a specialized extended-life capillary. This article discusses

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

· 174 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

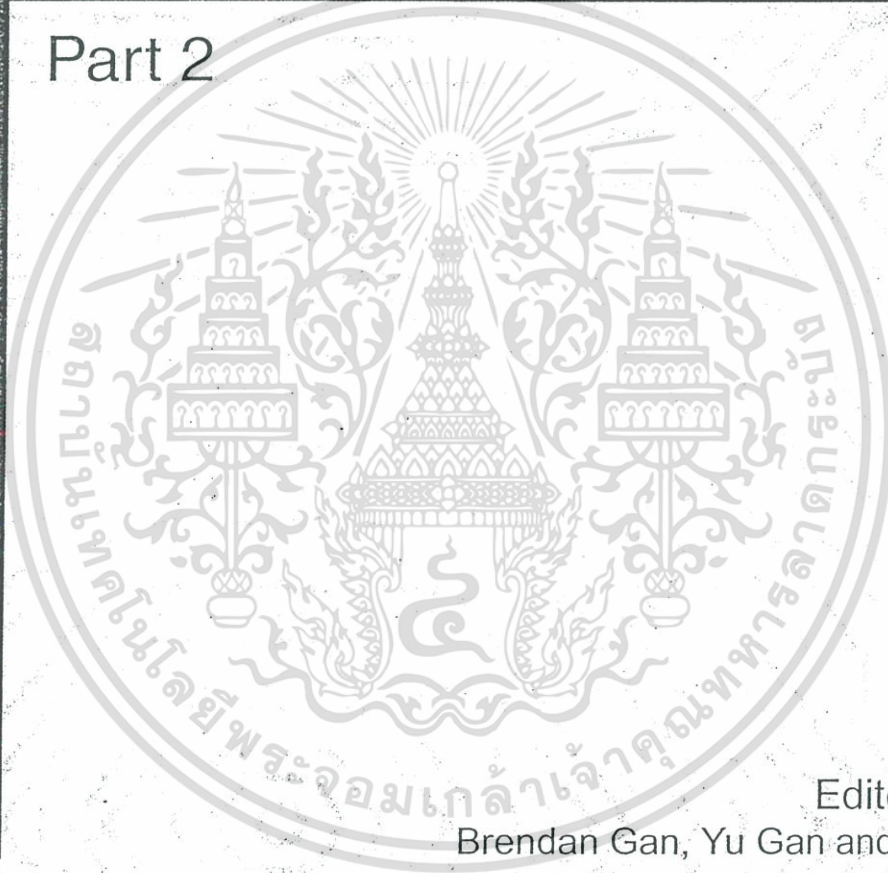
บทความทางวิชาการเรื่อง Electrostatic Control and New Device Handling Consideration for MEMS Manufacturing Process ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Applied Materials and Electronics Engineering, Part 2 จากการประชุมทางวิชาการ 2012 International Conference on Applied Materials and Electronics Engineering, วันที่ 18-19 มกราคม พ.ศ. 2555 ที่ประเทศฮ่องกง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applied Materials and Electronics Engineering

Part 2



Edited by
Brendan Gan, Yu Gan and Y. Yu

TTP TRANS TECH PUBLICATIONS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applied Materials and Electronics Engineering

PART 2

Selected, peer reviewed papers from the
2012 International Conference on
Applied Materials and Electronics Engineering
(AMEE 2012),
January 18-19, 2012, Hong Kong

Edited by

Brendan Gan, Yu Gan and Y. Yu

TTP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrostatic Control and New Device Handling Consideration for MEMS Manufacturing Process

Anusorn Chakkaew^{1,2,a}, Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang^{1,b}

¹ Electronic Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.

² Customer Technical Center, 3M Thailand Limited, Bangkok 10520, Thailand

^aachakkaew@mmm.com, ^bktwisut@kmitl.ac.th

Keywords: Electrostatic Discharge, ESD, Personal Grounding, MEMS

Abstract

Electrostatic potential and electrostatic discharge (ESD) has been a factory issue for years, not only limited to semiconductor-based electronic devices, but there are evidences that new devices from emerging technologies become sensitive which are MEMS and NEMS. This paper describes new electrostatic control and device handling solutions for critical electrostatic control environment for MEMS manufacturing processes. There are experiments of personnel grounding devices, device handling materials, and evaluation of static control surfaces.

Introduction

Electrostatic potential and electrostatic discharge (ESD) can cause catastrophic, direct, indirect and latent damages to electronic devices, and this has been a factory issue for electronic devices and parts manufacturers for years. This electrostatic issue is not only limited to semiconductor-based electronic devices. In recent years, advances in disk drive industry have resulted in a major concern regarding electrostatic potential and discharge during manufacture of head and is now well-accepted the most sensitive items for mass-produced product in electronic industry. However, there are evidences that new kind of devices from emerging technologies become sensitive through this year and is projected to continue in next years. These are microelectromechanical systems (MEMS) and nanoelectromechanical systems (NEMS) devices, which include microgap and nanogap assemblies that will inherently be extremely sensitive to electrostatic field and the electrostatic discharge. Unfortunately, increasing of contract manufacturers, made people from front-end semiconductor or assembly houses that now need to handle the highly electrostatic-sensitive MEMS, are fairly new to this extreme needs of static control solution and there is no industrial standard published for this electrostatic control level yet.

Personal Grounding

A. Personnel Grounding with Single Conductor Wrist Strap

Wrist strap is the most common static control device for people that handle ESD sensitive parts. This is to allow excess charge to drain from body to ground rapidly enough to avoid remaining charges. Proposed methodology is to measure actual electrostatic charge on personnel using Charge Analyzer with handheld electrode, attach a static control wrist strap to the wrist and connect to an electrical ground, perform body movements and observe electrostatic voltage with variations of body resistance to ground.

B. Personnel Grounding with Constant Wrist Strap Monitor

In critical environment of MEMS and IC manufacturing processes, they are moving from the single cord wrist strap to constant wrist strap monitor for a reliable ESD control solution. This is also called continuous monitors in ANSI/ESD-S20.20 [1], were designed to provide testing of the wrist strap system. While a number of technologies have been utilized, the goal remains consistent, electrical connections are tested between the ground point, coiled cord, wristband, and body while the wearer performs operations on static sensitive items. Failures are reported via audible and visual alarms.

Applied electrical current that may yield to have residual voltage or finger tips voltage on personnel, but this is the most reliable way of constant or continuous wrist strap monitoring.

MEMS Device Handling and Static Dissipation Using Dissipative Table Mat

In current practices, there are gloves or tweezers used for device handling, rather than direct contact from operator hand or fingers. Those materials should provide a slow, safe path for potential static charge to dissipate from the ESD sensitive part to ground or not. Further studies to understand the risk associated, the EM Aware was used to observe discharge event from operator finger, and from operator with metal tweezers.

Electrical resistance of table mat using in manufacturing process for electrostatic dissipation is measured with 5 pounds, 63 mm diameter electrode referenced in the ANSI/ESD S7.1 [2] standard. This electrode size is far bigger and heavier than MEMS device. Resistance to grounds through the static dissipative table mat of smaller and lighter devices may dramatic increase and greatly influence to static charge dissipation from the devices to ground through the table mat. This paper will experiment with 5 different electrodes with decreasing size and weight to simulate resistance to grounds through the static dissipative table mat of smaller and lighter devices.

Experiment and Result

Fig 1 shows personal electrostatic voltage measurement and evaluation of personnel without grounding, and with grounding through single conductor wrist strap and dual conductor wrist strap integrated with constant monitor. Table 1 is electrostatic voltage on the actual operator in manufacturing while walking and scuffing their feet. Purpose is to understand and specify maximum resistance limit being set at a wrist strap and shoe tester before entering to manufacturing area. Critical environment of MEMS processes are now moving from the single conductor wrist strap to this constant wrist strap monitor. Failures are reported via audible and visual alarms. There are questions about applied current that may yield to have residual voltage or finger tips voltage on operator, therefore two types of constant monitor are in the experiment.

Fig. 2 (a) and Fig. 2 (b) shows their applied voltage at open circuit, and contribution of this voltage to finger tips voltage on seated personnel wearing the wrist strap. The 2.26 volt and 3.62 volt on operator finger do not harm this MEMS but may not be applicable for more ESD sensitive devices in hard disk drive assembly.

In current practices, there are gloves or tweezers used for device handling, not a direct contact from operator fingers. Experiment in Fig. 3 shows static charge dissipation from the device to ground. The static event detector using electromagnetic interference technology is used to observe electrostatic discharge (ESD) event from operator finger, and from operator handling metal tweezers. Purpose of this experiment is to understand material characterization to provide slow, safe discharge path for selection of gloves, finger cots, tweezers, or materials that have direct contact to ESD sensitive parts like MEMS. This is to identify a proper dissipative resistance range suitable for each process and at each type of ESD sensitive device.

Table 2 shows experiment of electrical resistance of static dissipative table mat using in manufacturing process. Six different electrodes are in the experiment including normal 5 pounds, 63 mm electrode referenced in ESD S20.20 standard, and five new electrodes of decreasing size and weight to simulate resistance to grounds through the static dissipative table mat of smaller and lighter devices. The conventional 5 pound electrode gives low resistance to ground compared to lighter and smaller electrodes. Same for lighter and smaller devices, the dramatic increase in contact resistance from 10 Mohm to 825 Mohm of the mat will greatly influence to static charge dissipation from the devices like to ground through the surfaces.

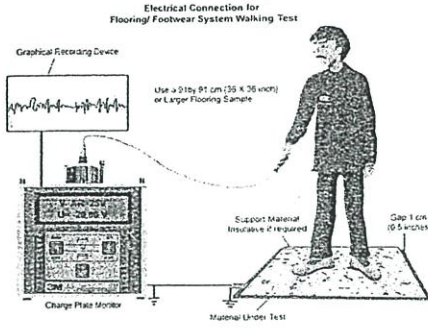


Figure 1. Experiment of personal electrostatic voltage measurement

Table 1 Electrostatic on Personnel Observed at Different Body Resistance to Ground

Body Resistance to Ground [Mohm]	Maximum Voltage [volt]
<1	<1
1	<1
5	5
10	10
35	45
50	65
100	180
200	350
No wrist strap	>900

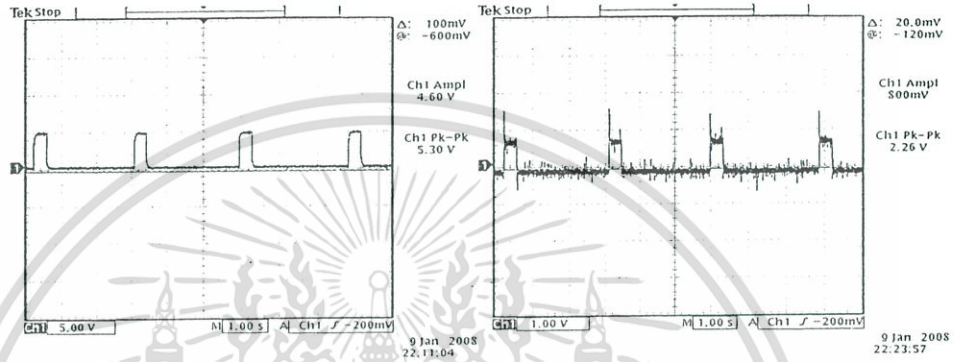


Figure 2 (a). Applied voltage of a constant wrist strap monitor at 5.30-volt peak, and contribution to voltage on seated personnel at 2.26 volt peak.

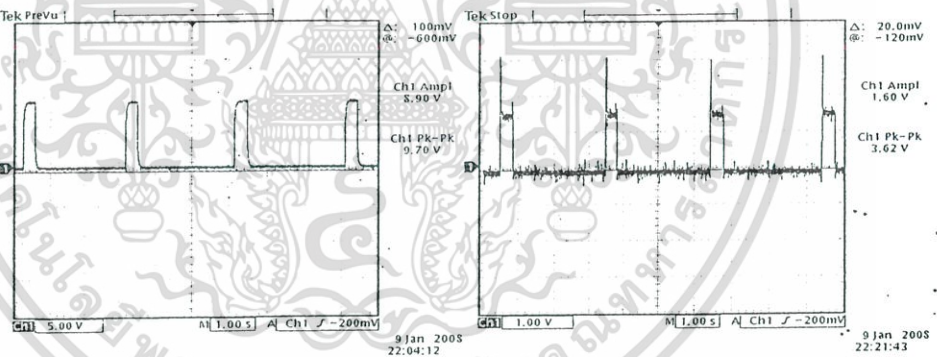


Figure 2 (b). Applied voltage of constant monitor at 9.70 volt peak, and contribution to voltage on seated personnel at 3.62 volt peak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

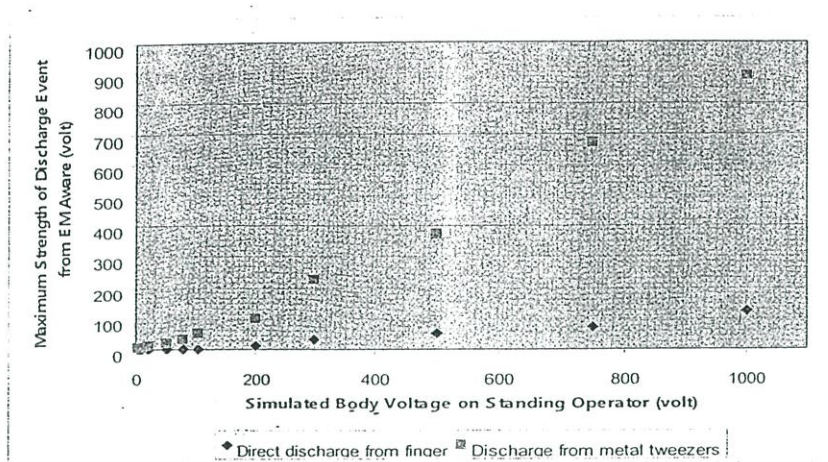


Figure 3. Electrostatic discharge event from operator finger and from operator with metal tweezers

Table 2 Resistance to ground of static control surface with different measuring electrodes

Electrode size (mm) & Diameter (mm)	63 dia, 20mm thick	63 dia, 20mm thick	50 dia, 10mm thick	20x20x20	10x10x10	5x5x5
Area (sq.mm)	3117.24	1963.50	1963.50	400.00	100.00	25.00
Weight (g)	2270	335	167	69	8.6	4.3
Weight/Area (g/sqmm)	0.7282	0.1706	0.0851	0.1725	0.086	0.172
Resistance of worksurface using the electrode	10 M ohm	22 M ohm	31 M ohm	56 M ohm	205 M ohm	825 M ohm

Conclusion

Fact-based ESD management allows focused attention to real electrostatic problems in semiconductor and MEMS manufacturing. We have shown new consideration of personal grounding devices, device handling materials, and evaluation of static control surfaces for critical ESD sensitive environments that now using in MEMS manufacturing.

References

- [1] ANSI/ESD S20.20-2007, Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices) 4, (2007).
- [2] ANSI/ESD S7.1, For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items - Floor Materials Characterization of Materials (2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการเรื่อง Electrostatic Discharge Simulation and Experimental Analysis of Electrostatic Control in Electronic Device Manufacturing ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร International Journal of Materials and Product Technology Vol. 44, Nos. 3/4, 2012



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Forthcoming articles




[International Journal of Materials and Product Technology](#)

These articles have been peer-reviewed and accepted for publication in IJMPT, but are pending final changes and are not yet published.

Therefore, the content conforms to our standards but the presentation (e.g. typesetting and proof-reading) is not necessarily up to the Inderscience standard.


Additionally, titles, authors, abstracts and keywords may change before publication. Articles will not be published until the final proofs are validated by their authors.

 Articles marked with this shopping trolley icon are available for purchase – click on the icon to send an email request to purchase.

 [Register for our alerting service](#), which notifies you by email when new issues of IJMPT are published online.

 We also offer [RSS feeds](#) which provide timely updates of tables of contents, newly published articles and calls for papers.

[International Journal of Materials and Product Technology](#) (29 papers in press)

[Sign up for new issue alerts](#)
[Subscribe/buy articles/issues](#)
[View sample issue](#)
[Latest issue contents](#) 
[Forthcoming articles](#)

Keep up-to-date

[Our Blog](#)
[Follow us on Twitter](#)
[Visit us on Facebook](#)
[Our Newsletter \(sign up\)](#)
[RSS Feeds](#)
[New issue alerts](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrostatic discharge simulation and experimental analysis of electrostatic control in electronic device manufacturing

Anusorn Chakkaew*

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Department of Electronic Engineering,
Faculty of Engineering,
Bangkok, 10520, Thailand
and
Customer Technical Center,
3M Thailand Limited, Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
E-mail: achakkaew@mmm.com
*Corresponding author

Wisut Titiroongruang

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Department of Electronic Engineering,
Faculty of Engineering,
Bangkok, 10520, Thailand
E-mail: ktwisut@kmitl.ac.th

Abstract: Electrostatic potential and electrostatic discharge (ESD) have been a factory issue for years, not only limited to semiconductor-based electronic devices, hard disk drive assemblies, and microelectromechanical systems and nanoelectromechanical systems devices, which are extremely sensitive to electrostatic field and the ESD. This paper presents ESD simulation and experimental analysis of electrostatic control in electronic device manufacturing. There are experiments of electrostatic on personnel, personnel grounding through wrist strap, through constant wrist strap monitor, and with static control footwear and floorings, machine grounding consideration, device handling materials, and ESD characterisation of static control surfaces for small and light devices.

Keywords: electrostatic discharge; ESD; personal grounding; human body voltage.

Reference to this paper should be made as follows: Chakkaew, A. and Titiroongruang, W. (2012) 'Electrostatic discharge simulation and experimental analysis of electrostatic control in electronic device manufacturing', *Int. J. Materials and Product Technology*, Vol. 44, Nos. 3/4, pp.160–173.

Biographical notes: Anusorn Chakkaew is a Technical Manager in Electro and Communications Laboratory of Customer Technical Center, 3M Thailand Limited. He is a Researcher of the Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. He is an Electrostatic Discharge Control Certified Engineer of the International

Association of Radio, Telecommunications and Electromagnetics (iNARTE), and a member of ESD Association. He is an invited steering committee member of Electrostatic Discharge Laboratory, National Electronic and Computer Technology Center (NECTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Ministry of Science, Thailand. He received his BEng in Electrical Engineering from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, and MEng in Electrical Engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

Wisut Titiroongruang is an Associate Professor of the Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. He received his BEng in Electronic from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, MEng and DEng in Solid State Electronics Engineering from Tokai University, Japan. He has also published more than 100 papers in refereed international journals and conferences.

This paper is a revised and expanded version of a paper entitled 'Electrostatic control and new device handling consideration for MEMS manufacturing process' presented at 2012 International Conference on Applied Materials and Electronics Engineering (AMEE 2012), Hong Kong, 18–19 January 2012.

1 Introduction

Electrostatic potential and electrostatic discharge (ESD) can cause catastrophic, direct, indirect and latent damages to electronic devices, and this has been a factory issue for electronic devices and parts manufacturers for years. This electrostatic issue is not only limited to semiconductor-based electronic devices. In recent years, advances in disk drive industry have resulted in a major concern regarding electrostatic potential and discharge during manufacture of head and is now well-accepted the most sensitive items for mass-produced product in electronic industry. However, there are evidences that new kind of devices from emerging technologies such as microelectromechanical systems and nanoelectromechanical systems devices also become sensitive through this year and is projected to continue in next years. Unfortunately, increasing of contract manufacturers, made people from front-end semiconductor or assembly houses that now need to handle the highly electrostatic-sensitive devices, are fairly new to this extreme needs of static control solution and there is no industrial standard published for this electrostatic control level yet. This paper presents ESD simulation and experimental analysis of electrostatic control in electronic device manufacturing. There are experiments of electrostatic on personnel, personnel grounding through wrist strap, personnel grounding through constant wrist strap monitor, static control of walking operators with static control footwear and floorings, machine grounding consideration, device handling materials, and ESD characterisation of static control surfaces for small and light devices.

2 Personal grounding

2.1 Personnel grounding of seated operator with single conductor wrist strap

Wrist strap is the most common static control device for people that handle ESD sensitive parts. This is to allow excess charge to drain from body to ground rapidly enough to

avoid remaining charges. The wrist strap is an assembled device consisting of a wrist band and ground cord that provides electrical connection of a person's skin to ground. We proposed a methodology to measure actual electrostatic charge on personnel using charge analyser with handheld electrode, attach a static control wrist strap to the wrist and connect to an electrical ground, perform body movements and observe electrostatic voltage on personnel.

2.2 Personnel grounding of seated operator with constant wrist strap monitor

In critical environment of device manufacturing processes, they are moving from the single conductor wrist strap to constant wrist strap monitor for a reliable ESD control solution. This is also called continuous monitors in ANSI/ESD-S20.20 (2007), which are designed to provide testing of the wrist strap system. While a number of technologies have been utilised, the goal remains consistent, electrical connections are tested between the ground point, coiled cord, wristband, and body while the wearer performs operations on static sensitive items. Failures are reported via audible and visual alarms.

2.3 Personnel grounding of walking operator with static control footwear and flooring

For standing and walking personnel where wrist strap is impractical, static control footwear (shoes) and static control surface is recommended. The static control footwear covering for the human foot have properties to control the accumulation of static charge when used in conjunction with a static control floor or floor finish, or floor mat. The static control floor material is a permanent installed floor material such as tile, carpet, polymer, epoxy, or sheet flooring that dissipates static charges by grounding personnel, equipment, or other objects contacting the floor material or that controls the generation and accumulation of static charges associated with floor materials.

3 Device handling and static dissipation using dissipative materials and table mat

In current practices, there are tweezers and static control table mats used for device handling, rather than direct contact from operator hand or fingers. Those materials should provide a slow, safe path for potential static charge to dissipate from the ESD sensitive part to ground or not. Further studies to understand the risk associated, the current transformer, oscilloscope and electromagnetic discharge monitor, EM Aware was used to observe discharge event from operator finger, and from operator with metal tweezers.

Electrical resistance of table mat used in manufacturing process for electrostatic dissipation is measured with 5 pounds, 63 mm diameter electrode referenced in the ANSI/ESD S7.1 (2005) standard. This electrode size is far bigger and heavier than electronic device. Resistance to grounds through the static dissipative table mat of smaller and lighter devices may dramatically increase and greatly influence static charge dissipation from the devices to ground through the table mat. This paper will experiment with five different electrodes with decreasing size and weight to simulate resistance to grounds through the static dissipative table mat of smaller and lighter devices.

4 Machine grounding and consideration

As technological and process requirements change, the demands for the quality of grounding change too. Simply complying with the safety standards and conventional ESD grounding standards is no longer enough (Kraz et al., 2002). When electromagnetic fields affect normal operation of equipment, EMI is present, and aggravated by poor installation or maintenance of equipment grounding.

For two identical tools, such as IC handlers in Figure 1, one tool is connected to ground by a short, wide, braided wire, the other via a long, coiled, thin-gauge wire. From the safety and ESD points of view, grounding of both tools meets the standards and is considered adequate for its operation. Existing standards specify properties of grounding mostly at DC and 50/60 Hz.

Figure 1 Tool is connected to ground by a short, wide, braided wire, the other via a long, coiled, thin-gauge wire (see online version for colours)

At higher frequencies, long, coiled wire forms an air-core inductor whose inductance is calculated as:

$$L = (r^2 \times n^2) / (9r + 10d) \quad (1)$$

where L is inductance in μH , r is radius of coil in inches, N is number of turns, d is length of coil in inches. As an example, if the extra ground wire is coiled to 12 inches diameter and has five turns, and the coil is 0.75 inches long, inductance of this coil 12.2 μH . At 100 MHz frequency, impedance of this coil will be 7.661 k ohm:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2)$$

where X_L is impedance, f is frequency, and L is inductance. A current of 1 mA going through this ground wire at 100 MHz would generate a voltage drop of 7.661 volt:

$$V = I \cdot X_L \quad (3)$$

where V is voltage, I is current, and X_L is impedance.

This means that the voltage on the ground of the tool will be 7.661 volt compare to the real ground. If the ground wire is not coiled but is too long inductance of a straight wire at high frequencies can be calculated as:

$$L = 0.002d [\ln(2d/r) - 1] \quad (4)$$

where L is inductance in μH , r = radius of the wire in centimetre, d is length of the wire in centimetre.

A common 10 m ground run of 12 gauge solid wire has self-inductance at high frequencies of 17.36 μH . The same 1 mA current at 100 MHz would create a voltage on

this length of wire of 10.9 volt. In both cases, the ground would pass all safety and ESD standards with no problems.

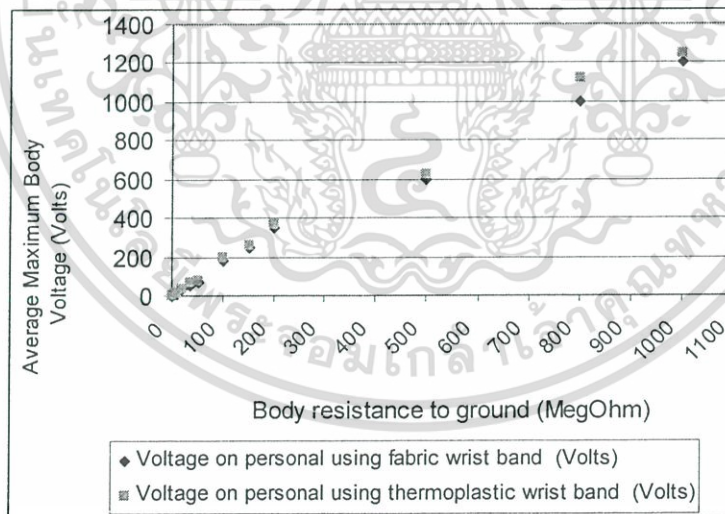
When a ground bounce occurs, the ground voltage on the tool may be significantly different from the one on the connected computer or another tool. This can easily garble the communications between the tool and a computer, and the tool can stop working. Excessive voltage on the tools also can cause damage to sensitive components. Because of long ground wires with associated inductance, the voltage on different parts of supposedly grounded tools is not the same.

5 Experimental result and discussion

5.1 Electrostatic on seated operator (experiment validation)

Wrist straps are the most common static control device for people that handle ESD sensitive parts. This is to allow excess charge to drain from body to ground rapidly enough to remaining charges. Figure 2 shows electrostatic voltage on person while seated and wearing wrist strap, but scuffing their shoes with floor material to simulate the worst case. The wrist strap is connected to ground via adjustable resistance box, purpose of this experiment is to understand electrostatic on personnel at different body resistance to ground, and to specify maximum resistance limit being set at a wrist strap and shoe tester before entering to manufacturing area.

Figure 2 Electrostatic on personnel at different body resistance to ground via wrist strap and thermoplastic adjustable resistance box (see online version for colours)



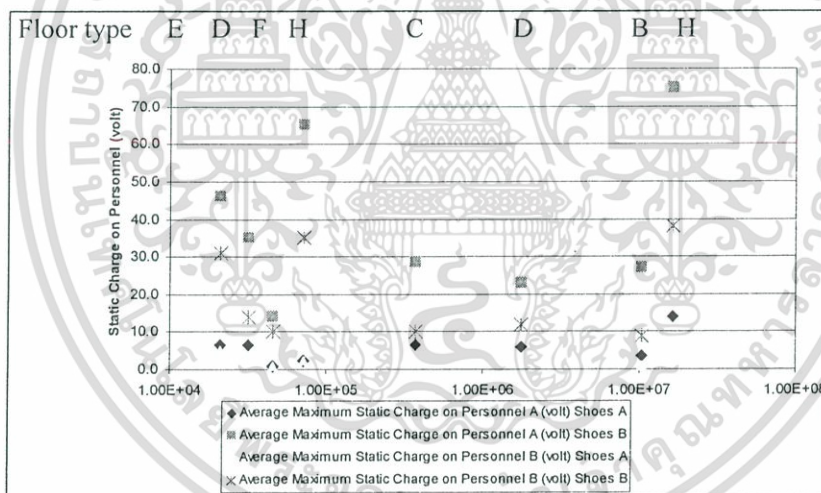
It has been shown that for a wrist strap system, the resistance of the person to ground has a direct correlation to the maximum voltage on a person. For wrist straps, Figure 2 may be used.

Two types of wrist band are used in the experiment with same ground cord, conductive fabric wrist band and thermoplastic wrist band. Result from the experiment shows voltage on personal using the thermoplastic wrist band is higher than voltage on personal using the fabric wrist band. The thermoplastic wrist band with zipper style latching mechanism is less conformed to wearer’s wrist compare to the fabric. So this lesser contact may cause higher skin resistance and slower electrostatic dissipation to ground, and yield the differences.

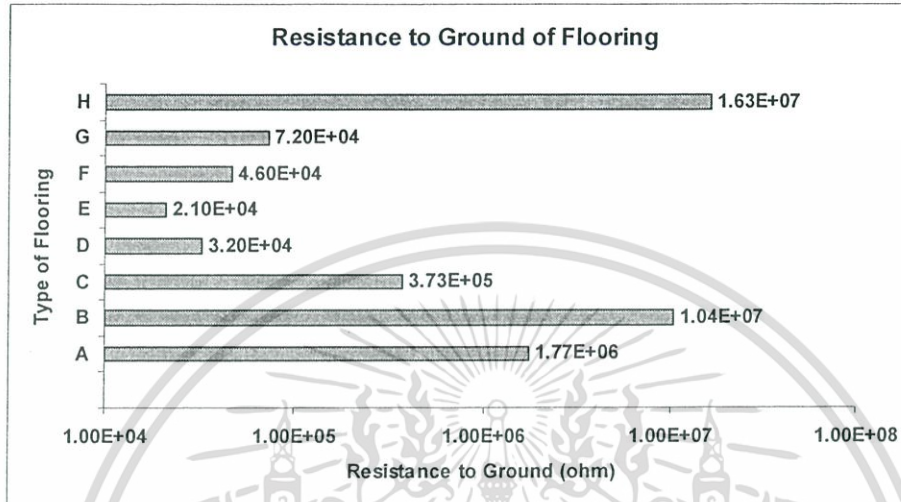
5.2 Electrostatic on standing and walking operations from different types of static control footwear and static control flooring

For standing and walking personnel where wrist strap and ground cord is impractical, static control footwear and static control flooring is recommended. Figure 3 is the experiment of electrostatic voltage measurement on walking persons, where different types of static control footwear and static control flooring are evaluated in combination. This is to understand electrostatic generation observed on the walking persons and to select the type of footwear and flooring to be used.

Figure 3 Maximum electrostatic on walking personnel with no wrist strap, but using different types of static control shoes and static control flooring (see online version for colours)



Figures 3 and 4 show that resistance to ground of the flooring is not sufficient to select the floor for installation which most of electronic industry currently rely on. It has been shown that for a flooring system, the resistance of the floor has no direct correlation to the maximum voltage on a person, and Figure 2 cannot be used. For example, the floor E is with lowest resistance and this should perform the best for static generation on walking personal. But the floor E generates higher electrostatic compared to floor C and D which are at higher resistance. Performance in combination by electrostatic charge evaluation on personnel should be considered for proper selection.

Figure 4 Resistance to ground of flooring experiment in the Figure 3 (see online version for colours)

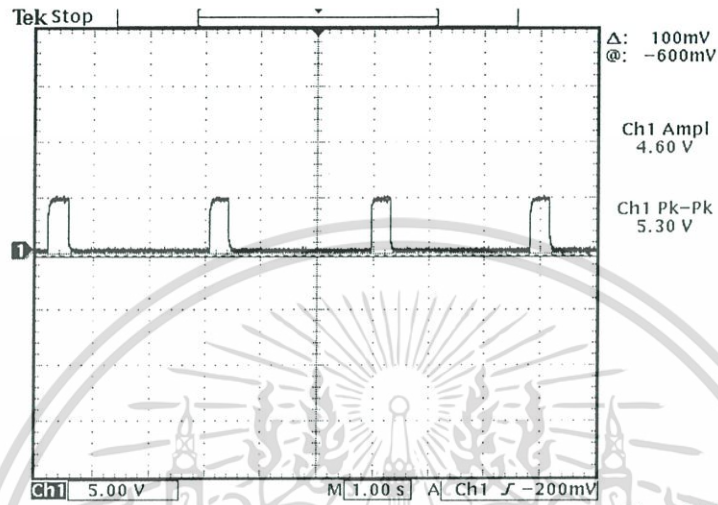
5.3 Electrostatic on seated operator using constant wrist strap monitor

Constant wrist strap monitors were designed to provide testing of the wrist strap system. While a number of technologies have been utilised, the goal remains consistent; electrical connections are tested between the ground point, coiled cord, wristband, and body while the wearer performs operations on static sensitive items. Failures are reported via audible and visual alarms. Critical environment of device manufacturing processes are now moving from the single conductor wrist strap to the constant wrist strap monitor.

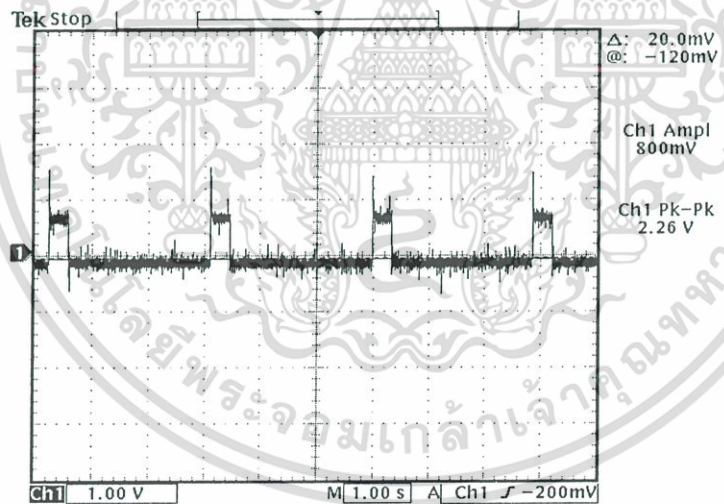
A widely used constant monitor is resistance with dual conductor wrist strap. For example, a DC signal (current) goes through a wire to the first half of the wristband. Crossing the person's skin, the signal enters the second half of the wristband, and returns through the second wire to the monitor. There are discussions about applied current that may yield to have residual voltage or finger tips voltage on operators. Two types of constant monitor are in this experiment.

Figure 5(a) and Figure 5(b) show their applied voltage at open circuit, and contribution of this voltage to finger tips voltage on seated personnel wearing the wrist strap. The Figure 6(a) and Figure 6(b) are the same but from another constant wrist strap monitor. The 2.26 volt and 3.62 volt on operator finger is considered human body voltage and should be compared with device's electrostatic susceptibility level. This level does not harm electronic devices such as integrated circuit, but may result to failures for more ESD sensitive devices in hard disk drive assembly.

Figure 5 Applied voltage of a constant wrist strap monitor at 5.30 volt peak, and contribution to voltage on seated personnel at 2.26 volt peak



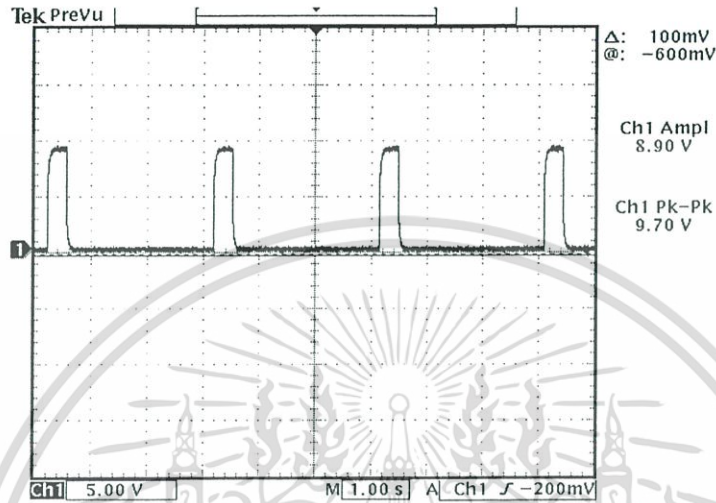
(a)



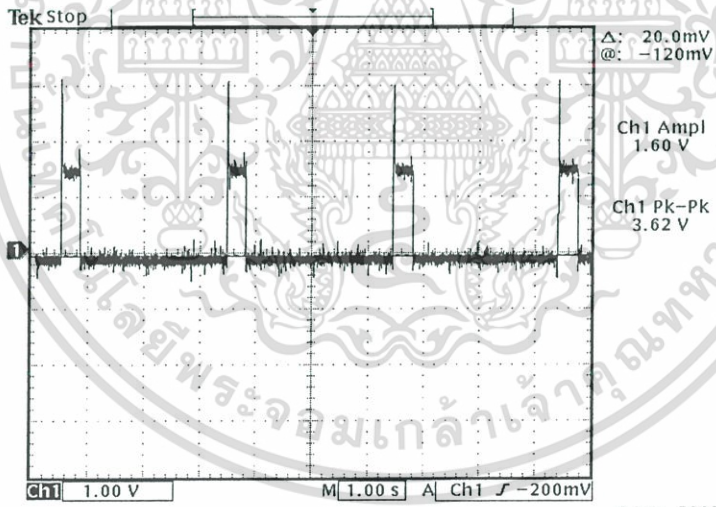
(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 6 Applied voltage of a constant monitor at 9.70 volt peak, and contribution to voltage on seated personnel at 3.62 volt peak



(a)



(b)

5.4 ESD simulation of device handling materials

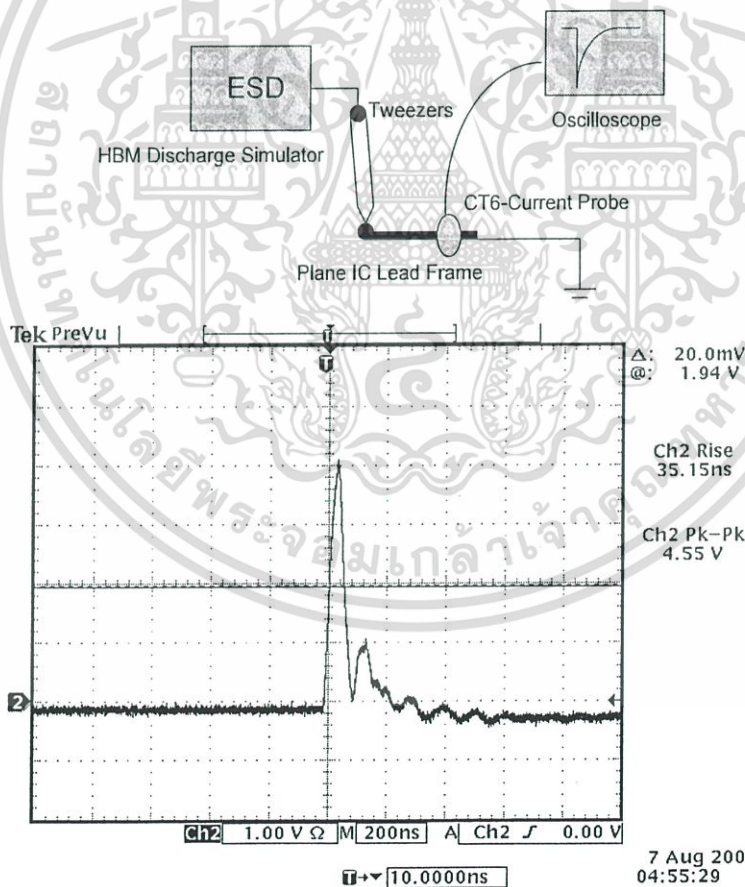
In current practices, there are dissipative materials such as dissipative table mat and tweezers used for device handling rather than operator fingers. Experiment in Figure 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shows static charge dissipation from the device to ground. We have adopted a standard ESD simulator with human body model or HBM discharge network comprised of a 100 pF capacitor and a 1,500 ohm resistor to perform ESD simulation on the materials under test. The ETS431 and Schaffner NSG432 have been used for the HBM simulation. The current discharge pulse pattern have been captured by a Tektronix CT-6 current probe coupled into a Tektronix Digital Oscilloscope with a 2.5 GS/s sampling rate and a bandwidth of 300 MHz.

The 3M EM aware static event detector using electromagnetic interference principle has also been used to observe ESD event from operator finger, and from operator handling metal tweezers. The purpose of these experiments are to understand material characterisations to provide slow, safe discharge path for selection of tweezers, and dissipative surfaces that have direct contact to ESD sensitive parts. This is to identify a proper dissipative resistance range suitable for each process and at each type of ESD sensitive device.

Figure 7 Discharge simulator with device handling materials to device lead frame and discharge waveform (see online version for colours)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 8 Discharge current from the HBM discharge simulator at 1,000 volt through two dissipative table mats to device lead frame (see online version for colours)

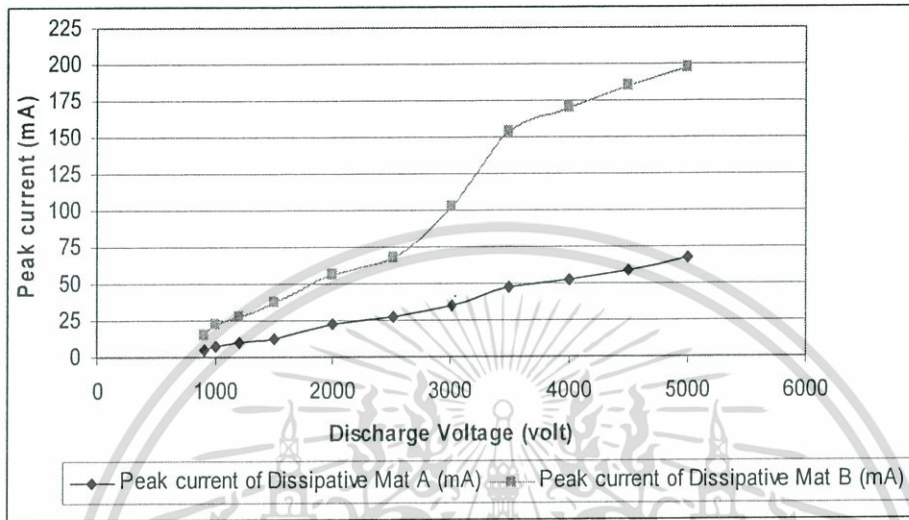
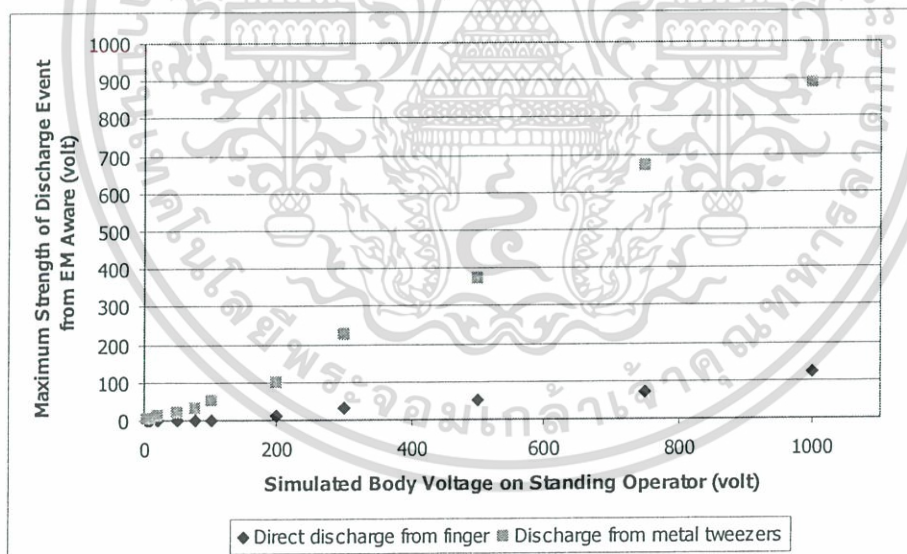


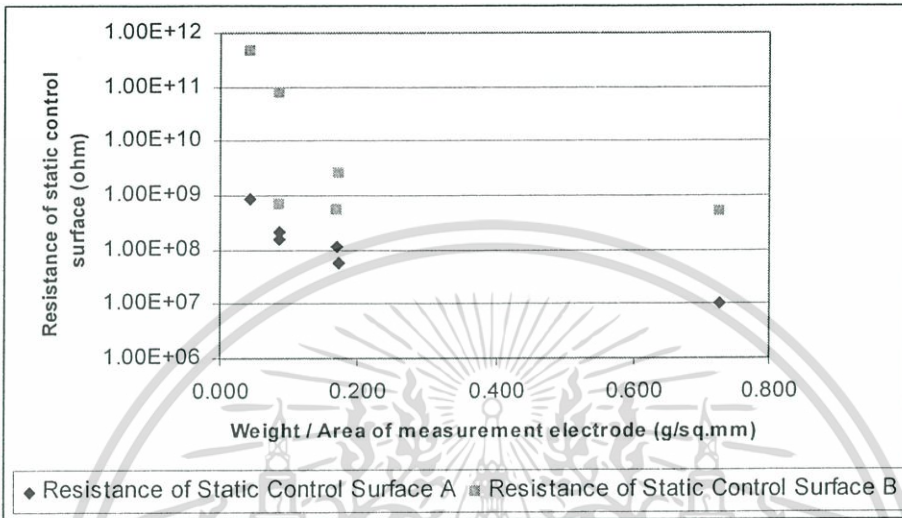
Figure 9 Direct ESD from operator and from operator holding metal tweezers to device lead frame (see online version for colours)



In Figure 8, the dissipative mat sample A provides lower peak current compared to dissipative mat sample B, which is a dissipative material characterisation to determine effectiveness of providing a slow, safe discharge path. Figure 9 shows ESD event observed by the 3M EM Aware from operator finger tip and from operator holding metal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 10 Resistance to ground of static control surface with different shapes and sizes of measuring electrodes (see online version for colours)



5.6 Equipment grounding using digital multimeter and impedance meter per ANSI/ESD S6.1 standard (experiment validation)

Proper grounding is crucial for the safe and uninterrupted operation of equipment. In critical environments, a faulty ground connection may result in personnel exposure to dangerous voltages, equipment lockups or malfunctions, and damage to sensitive components. Proper grounding has become one of the most important concerns in facility and tool management.

A dedicated ground integrity meter or impedance meter ground impedance in accordance with ANSI/ESD S6.1 (2009) and ANSI/ESD S20.20 (2007) standards. It provides accurate measurements of ground impedance when ground noise is present, area where most regular instruments fail. An electrical circuit is developed for this experiment using 10 ohm resistor and having 9 mA current passing through to simulate a ground noise.

Table 2 The experiment using 10 ohm resistor having 9 mA current passing through to simulate a ground noise, and reading from digital multimeter and ground impedance meter

Type of measurement	10 ohm resistor with 9 mA current	
	Red (+) black (-)	Red (+) black (-)
Digital multimeter and reading (ohm)	-68 ohm	-68 ohm
Impedance meter (ESD S6.1 standard)	10 ohm	10 ohm

A conventional multimeter determines ground resistance by applying some current to the load and measuring the load voltage. This works well unless there is extraneous noise when the tools are operational. In these situations, the multimeter may show a very significant error or odd readings such as negative resistance shown in Table 2.

Also, an AC impedance meter can be affected by high-frequency noise. For accurate measurements of ground, it is better to use an instrument that can separate measurement signal and noise.

6 Conclusions

Fact-based ESD management allows focused attention to real electrostatic problems in electronic device manufacturing. We have shown new considerations with ESD simulation and experimental analysis of electrostatic control in electronic device manufacturing. There are electrostatic on personnel, personnel grounding through wrist strap, personnel grounding through constant wrist strap monitor, and through static control footwear and floorings, machine grounding consideration, device handling materials, and ESD characterisation of static control surfaces for small and light devices that are now manufactured in device manufacturing process.

References

- ANSI/ESD S20.20-2007 (2007) *Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices) 4*, Electrostatic Discharge Association.
- ANSI/ESD S4.1 (2006) *For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items. Worksurfaces – Resistance Measurements*, Electrostatic Discharge Association.
- ANSI/ESD S6.1 (2009) *For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items – Grounding*, Electrostatic Discharge Association.
- ANSI/ESD S7.1 (2005) *For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items – Floor Materials Characterization of Materials*, Electrostatic Discharge Association.
- ESD ADV1.0 (2009) *For Electrostatic Discharge Terminology – Glossary*, Electrostatic Discharge Association.
- Kraz, V., Credence Technologies, Gagnon, J.E.P. and Texas Instrument (2002) *How Good is Your Ground*, EE-Evaluation Engineering, January.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอนุสรณ์ จักรแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	25 ตุลาคม 2514 ที่จังหวัดเพชรบุรี
ที่อยู่	161/39 หมู่บ้านชวนชื่นเรซิดเอนซ์ปาร์ค 2 ซอยคูบัว 27 แยก 11 ถ.คูบัว แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220 โทร. 085 441 9193, 02 509 4434
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2538 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ.2545 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบและการควบคุมไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 2.) ประกาศนียบัตรอบรมมาตรฐาน ANSI/ESD S20.20 โดย ESD Association (ESDA) ปี พ.ศ.2545 2.) ประกาศนียบัตรวิศวกรควบคุมไฟฟ้าสถิต NARTE ESD Control Certified Engineer, International Association for Radio, Telecommunications and Electromagnetics (INARTE) ปี พ.ศ.2547 4.) สมาชิกของ Electrostatic Discharge Association (ESDA), USA ปี พ.ศ.2539 ถึงปัจจุบัน 5.) กรรมการรับเชิญ ห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าสถิต ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปี พ.ศ. 2554 ถึง 2555
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2538-2540	Equipment Engineer บริษัท Seagate Technology ประเทศไทย จำกัด
พ.ศ.2540	Technical Support Engineer บริษัท 3M ประเทศไทย จำกัด
ปัจจุบัน	Technical Support Manager บริษัท 3M ประเทศไทย จำกัด
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	
พ.ศ.2544	การศึกษาปริมาณไฟฟ้าสถิตบนร่างกายที่มีผลจากค่าความต้านทานและความชื้นสัมพัทธ์ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ.2544	The Reduction of Static Charge on Personnel in Electronic Industry, International Conference of Mechantronics (ICOM-2001), Kuala Lumpur, Malaysia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

- พ.ศ.2553 Electrostatic Control and The Need of Feedback Control Ionization in Critical Environment of MEMS Manufacturing Process, China Semiconductor Technology International Conference 2010), Shanghai, China
- พ.ศ.2553 Personnel Grounding and Electrostatic Control for Critical Environment of MEMS Manufacturing Process, Key Engineering Materials
- พ.ศ.2555 Electrostatic Control and New Device Handling Consideration for MEMS Manufacturing Process, Advanced Materials Research
- พ.ศ.2555 Advanced Material Evaluations and Considerations for Electrostatic Control in Electronic Device Manufacturing, Advanced Science Letter
- พ.ศ.2555 Electrostatic Discharge Simulation and Experimental Analysis of Electrostatic Control in Electronic Device Manufacturing, International Journal of Materials and Products Technology, Vol. 44, Nos. 3/4, 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้