



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์



เครื่องวัดความชื้นไม้

Wood Moisture Meter

นายวิจิต ศิริโชติ

นางสาวชนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์

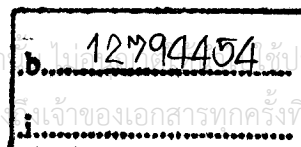
นายสิทธิชัย หมอป่า

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขทမ်း.....
เลขทะเบียน **143543**
วันเดือนปี **17 ค.ค. 2559**



b.....12794404.....
j.....

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เครื่องวัดความชื้น ไม้

แหล่งเงิน ทุนสนับสนุนงบวิจัยจากแหล่งเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 140,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 พ.ย. 55 ถึง 30 ต.ค. 56

นายวิจิต ศิริโชค ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

นางสาว ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

บทคัดย่อ

ความชื้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา การคงสภาพอยู่ของไม้ คุณสมบัติทางกลรวมถึง การต้านทานต่อแมลง การคำนวณค่าความชื้นของไม้มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการก่อสร้างและโรงงานที่ สร้างผลิตภัณฑ์ที่มาจากไม้ ดังนั้นกระบวนการในการวัดความชื้นของไม้ จึงมีความสำคัญและถูกพัฒนาขึ้น โดยอาศัยการวัดค่าความต้านทานและค่าไดอิเล็กตริกของสาร โดยออกแบบให้ใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่สัมผัสกับ ผิวไม้ขั้วไฟฟ้าทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมและมีกรอบพลาสติกเพื่อป้องกันการรบกวนจากสัญญาณหรือประจุ ไฟฟ้าภายนอกกระบวนการวัดใช้การวัดแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนไปของสัญญาณซึ่งทำการเปรียบเทียบ สัญญาณที่ฝั่งขาออกและสัญญาณขาเข้าที่เป็นสัญญาณอ้างอิงร่วมกับการวัดค่าอุณหภูมิเพื่อแก้ปัญหาเรื่อง ความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิซึ่งระบบประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรเปลี่ยนสัญญาณ อนาล็อกเป็นดิจิทัล เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ มีหน่วยความจำภายในซึ่งทำหน้าที่เก็บข้อมูลค่าคงที่ของไม้แต่ละ ชนิด มีแบตเตอรี่สำรองสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะทำการอ่านสัญญาณจากวงจรคอมพิวเตอร์ และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิเพื่อคำนวณและวัดค่าแล้วส่งข้อมูลไปยังหน้าจอแอลซีดี เพื่อแสดงผลการวัด ความชื้นของไม้ นอกจากนี้เครื่องวัดยังประกอบด้วยปุ่มกดเลือกฟังก์ชันการวัดสำหรับไม้แต่ละชนิด ออกแบบให้มีขนาดเล็กสามารถนำไปใช้งานนอกสถานที่ได้สะดวก ให้ค่าการวัดได้ถูกต้อง ส่วนประกอบ ของเครื่องไม้ซับซ้อนและมีราคาถูกลงลดการนำเข้าเครื่องมือวัดจากต่างประเทศ

เว้น 1 บรรทัด

คำสำคัญ : ค่าความชื้น , ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Wood Moisture Meter.....

Researcher:.....Wichit Sirichote.....**Faculty:** Science.....**Department:** Applied Physics.....

.....Tanaporn Leelawattananon.....**Faculty:** Science.....**Department:** Applied Physics.....

ABSTRACT

Moisture as an important influence factor on fungal growth and mechanism property needs to be considered for manufacturing furniture and wood-based products. Therefore, a wood moisture meter measuring and data logging method for wood in factory was developed. The method is based on measuring the electrical resistance and dielectric constant with 2 electrodes probe for sustainable connection. The measuring point at the tip of the electrodes was contacting into the wood, the remaining outer part of the electrodes was contact with an aluminum plate and plastic flame. For this purpose, special aluminum and plastic flam were protect external electric charge noise. the method measure amplitude and phase shift of the signal and compare signal from output and input referent source signal. The most suitable system consisted of a microcontroller 32 bit , analog to digital converter circuit , temperature sensor , internal memory for backup wood constant data and battery power backup the microcoller read data form comparator and temperature sensor calculate, measuring and sent data to graphic LCD module to show the moisture content. The wood moisture meter consist function key for select wood material and a body component are low cost. The measurement system are portable for measurement in the outside work area.

Keywords : Moisture content , dielectric constant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จได้เลยหากไม่ได้รับการสนับสนุนและให้ความร่วมมือจากหลายฝ่าย ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ได้เอื้อเพื่อ สถานที่ เครื่องมือและทรัพยากรที่จำเป็นในการวิจัยและ “การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556” และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงที่ได้หยิบยกมาที่ทำให้มีแนวทางในการวิจัยเพิ่มมากขึ้นและขอบคุณ บิดามารดา ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้สั่งสอนอบรม ให้มีความรู้และเป็นคนดีของสังคมและประเทศชาติ ขอขอบคุณบุตรและภรรยาที่ได้เป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาที่ได้ดำเนินการวิจัย



นายวิจิต ศรีโชติ หัวหน้าโครงการวิจัย

นางสาวธนภรณ์ ถีลาวัฒนานนท์ ผู้ร่วมวิจัย

นายสิทธิชัย หมอป่า ผู้ช่วยนักวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	1
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 ความสำคัญของการวัดค่าความชื้นไม้.....	3
2.1.2 คุณสมบัติของไม้.....	3
2.1.3 การพิจารณาค่าความชื้นในไม้.....	4
2.1.4 อุตสาหกรรมการแปรรูปไม้.....	6
2.1.5 ผลของค่าความชื้นต่อคุณสมบัติของไม้.....	7
2.1.6 การหาค่าความชื้นของเนื้อไม้.....	10
2.1.7 หลักการของเครื่องวัดค่าความชื้นในไม้.....	10
2.1.8 การวัดค่าความชื้นโดยอ้อม.....	13
2.1.9 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อความแม่นยำในการวัดความชื้น.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 ทฤษฎีของคลื่นสนามไฟฟ้า.....	16
2.2.1 กฎของคูลอมบ์.....	16
2.2.2 ความเข้มสนามไฟฟ้า.....	16
2.2.3 สนามเนื่องจากประจุที่กระจายอย่างสม่ำเสมอในปริมาตรหนึ่ง.....	17
2.2.4 สนามสำหรับเส้นประจุ(Field of line charge).....	17
2.2.5 สนามเนื่องจากประจุชนิดแผ่น(Field of Sheet of Charge).....	22
2.2.6 สนามเส้นกระแสและการเขียนรูปแทนเส้นสนาม(Streamlines and Sketches of Fields).....	24
2.2.7 ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า(Electric Flux Density).....	27
2.2.8 กฎของเกาส์ (Gauss's Law).....	29
2.2.9 ไดเวอร์เจนซ์(Divergence).....	32
2.2.10 โอเปอเรเตอร์ ทางเวกเตอร์ ∇ และทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์.....	33
2.2.11 พลังงานและศักย์ไฟฟ้า.....	36
2.2.12 พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุจุดภายใต้สนามไฟฟ้า.....	36
2.2.13 ความต่างศักย์และศักย์ไฟฟ้า(Definition of potential Difference and Potential).....	37
2.2.14 สนามศักย์ไฟฟ้าของระบบประจุ(The Potential Field of a System of Charges).....	39
2.2.15 เกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า(Potential Gradient).....	39
2.2.16 โอเปอเรเตอร์เวกเตอร์.....	44
2.2.17 ไดโพล(Dipole).....	45
2.2.18 สารไดอิเล็กตริก.....	48
2.2.19 ธรรมชาติของสารไดอิเล็กตริก.....	49
2.2.20 เงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อสำหรับสาร ไดอิเล็กตริกสมบูรณ์.....	54
2.2.21 ค่าความจุไฟฟ้า.....	59
2.2.22 การใช้ภาพร่างของสนามในการประมาณค่าความจุไฟฟ้ากรณีสองมิติ.....	61
2.2.23 การแพร่กระจายในตัวนำ:ปรากฏการณ์ความลึกลับ.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 หลักการวัดค่าทางไฟฟ้าและส่วนประมวลผล.....	65
2.3.1 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบอาศัยการคายประจุของตัวเก็บประจุ.....	65
2.3.2 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยอาศัยการวัดค่าไฟฟ้ากระแสสลับ.....	69
2.3.2 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และการสั่งงาน.....	69
2.3.3 ภาษาของการเขียนโปรแกรม.....	73
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	74
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	76
3.1 การออกแบบส่วนประกอบเครื่องวัดค่าความชื้นของไม้.....	76
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	77
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	80
3.4 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และการประมวลผลสัญญาณ.....	85
3.5 การทดลองและบันทึกค่า.....	86
3.6 ออกแบบโปรแกรมและฟังก์ชันการวัดของตัวเครื่อง.....	87
3.7 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัด.....	88
3.8 ปรับปรุงซอฟต์แวร์ขั้นสุดท้ายและทำคู่มือการใช้งาน.....	89
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	90
4.1 ข้อมูลค่าสัญญาณที่ได้จากวงจรเซนเซอร์.....	91
4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดความชื้นที่สร้างขึ้น.....	94
4.3 ผลการวัดค่าความชื้นไม้ของเครื่องมือที่สร้างขึ้นเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน.....	95
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	96
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม เอกสารอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก.....	100
ประวัตินักวิจัย.....	135



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สถิติการส่งออกอุตสาหกรรมที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบ.....	5
2.2 ค่ากลสมบัตินี้ของไม้แต่ละชนิด.....	7
2.3 ตัวอย่างการหดตัวเฉลี่ยของไม้แต่ละชนิด.....	9
4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของไม้ที่มีความชื้นต่างกันซึ่งวัดค่าโดยใช้มัลติมิเตอร์.....	89
4.2 ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นเพลทเซรามิกแต่ละขนาด.....	89
4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแบบที่ 1.....	91
4.4 ค่าความต่างศักย์จากวงจรแบบที่ 2 เมื่อไม้มีความชื้นต่างกัน.....	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างเครื่องวัดความชื้นในไม้.....	3
2.2 น้ำภายในเซลล์และน้ำที่ผนังเซลล์.....	4
2.3 อุดสาหกรรมกรรมการแปรรูปไม้.....	6
2.4 การหดตัวและพองตัวของไม้ด้านต่างๆ.....	9
2.5 ขั้นตอนการหาค่าความชื้นโดยการอบแห้ง.....	11
2.6 เครื่องวัดความชื้นโดยตรง.....	11
2.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น.....	12
2.8 ส่วนประกอบเครื่องวัดความชื้นแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	13
2.9 ส่วนประกอบเครื่องวัดความชื้นแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	13
2.10 แบบโครงสร้างหัวโพรบวัดค่าไดอิเล็กตริก.....	14
2.11 ตัวอย่างวงจรเครื่องวัดความชื้นอย่างง่าย.....	15
2.12 การอินทิเกรตโดยไม่ว่าจนถึงปริมาตร.....	22
2.13 ประจุแผ่นขนาคกว้างยาวอนันต์วางบนระนาบ yz	23
2.14 แบบร่างของเส้นกระแสสนามแบบต่างๆ.....	26
2.15 พลังค์ไฟฟ้าบริเวณระหว่างทรงกลม 2 ชั้นที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน.....	27
2.16 ความหนาแน่นพลังค์ไฟฟ้า D , ที่จุด P อันเนื่องมาจากประจุ Q	30
2.17 การประยุกต์กฎของเกาส์ในการหาสนามไฟฟ้าที่พุ่งออกมาจากประจุ Q บนผิวปิดทรงกลม.....	31
2.18 แสดงทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์สำหรับพลังค์ทั้งหมดที่พุ่งผ่านผิวปิด.....	35
2.19 เวกเตอร์ความยาวที่เพิ่มขึ้นเป็น ΔL ทำมุม θ กับสนาม E	41
2.20 สนามศักย์ไฟฟ้าที่แสดงโดยผิวสมศักย์ ที่จุดต่างๆบนผิวสมศักย์.....	42
2.21 โครงสร้างของไดโพลไฟฟ้า ที่อยู่ในทิศ α สำหรับระยะทางจากไดโพลไปยังจุด P	46
2.22 สนามไฟฟ้าสถิตของจุดไดโพลที่มีโมเมนต์อยู่ในทิศ α พร้อมกับผิวสมศักย์ 6 ค่า.....	47
2.23 ผิวสัมผัสที่รอยต่อระหว่างสารไดอิเล็กตริกสมบูรณ 2 ชนิด.....	56
2.24 ตัวอย่างภาพวาดเส้นพลังค์ไฟฟ้า.....	62
2.25 เส้นกระแสที่วาดโดยแต่ละเส้นวาดให้ตั้งฉากกับตัวนำ.....	64
2.26 การคายประจุของตัวเก็บประจุ.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.27 แสดงการคายประจุเมื่อสับสวิตช์.....	68
2.28 แสดงค่าแรงดันเมื่อทำการชาร์จประจุ.....	68
2.29 แสดงการต่อวงจรคอมพิวเตอร์ในข่าไมโครคอนโทรลเลอร์.....	68
2.30 แสดงโครงสร้างการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458.....	71
3.1 เครื่องวัดความชื้นแบบใช้การวัดค่าไดอิเล็กตริก.....	77
3.2 ดิจิตอลอสซิลโลสโคป.....	77
3.3 ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์.....	77
3.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	78
3.5 เครื่องวัดความชื้นในอากาศ.....	78
3.6 บอร์ดเรียนรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	78
3.7 ชุดแผงวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	79
3.8 ลอจิกโพรบสำหรับวัดค่าลอจิกของสัญญาณ.....	79
3.9 คอมพิวเตอร์และชุดซอฟต์แวร์สำหรับพัฒนาโปรแกรม.....	79
3.10 การวัดค่าความจุไฟฟ้าจากแผ่นตัวนำแบบขนานโดยมีตัวกลางที่เป็นไม้และอากาศ.....	80
3.11 การจัดชุดอุปกรณ์วัดค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งไปยังเนื้อไม้.....	81
3.12 วงจรภาคเซนเซอร์แบบที่ 1.....	81
3.13 แผ่นเพลทเซนเซอร์ แบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้ง.....	82
3.14 การเตรียมแผ่นสแตนเลสเพื่อสร้างหัวโพรบวัด.....	82
3.15 ตัวอย่างไม้เต็งรังที่ใช้วัดค่าซึ่งมีความชื้นต่างกัน.....	82
3.16 การต่อวงจรเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์.....	82
3.17 ผู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับทดลองวัดค่า.....	83
3.18 วงจรภาคเซนเซอร์แบบที่ 2.....	83
3.19 การวัดค่าความต่างศักย์จากวงจรแบบที่ 2 โดยการสัมผัสกับไม้ที่มีความชื้น.....	84
3.20 การจัดวางวงจรชุดเซนเซอร์เพื่อวัดค่าความต่างศักย์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.....	84
3.21 การจัดวางชุดทดลองวัดค่าความต่างศักย์.....	84
3.22 วงจรภาคเซนเซอร์แบบที่ 3.....	85
3.23 ด้านหน้าและด้านหลังแผงวงจรเครื่องวัดความชื้นไม้.....	85
3.24 แผงวงจรที่ผ่านการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	85
3.25 การจัดชุดทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของ ไม้แห้ง และไม้ที่มีความชื้นต่างกัน.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.26 การวัดความชื้นของไม้ตัวอย่าง.....	87
3.27 ไม้ตัวอย่างที่นำมาวัดค่าความชื้น.....	87
4.1//สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตจากวงจร โพรบวัด.....	90
4.2//สัญญาณจากเครื่องวัดเมื่อไม้ความชื้น 8 % และ 26 %.....	90
4.3//ความคลาดเคลื่อนของความต่างศักย์เนื่องจากอุณหภูมิ.....	91
4.4//ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์จากชุดเซนเซอร์แบบที่ 1เทียบกับอุณหภูมิ.....	92
4.5//สัญญาณที่มอดูเลตแล้วซึ่งวัดจากปลายหัวโพรบ.....	92
4.6//สัญญาณความถี่สูง 15 kHz ที่อยู่ในสัญญาณความถี่ต่ำตัวพา 500 Hz.....	93
4.7//ความจุไฟฟ้าของอากาศเทียบกับอุณหภูมิ.....	93
4.8//ความจุไฟฟ้าของไม้ที่มีความชื้น 7 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 25-55 องศาเซลเซียส.....	93
4.9//ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับค่าความชื้นของไม้พาลาทีอุณหภูมิ 25-55 องศาเซลเซียส.....	94
4.10//การประมาณค่าสมการเชิงเส้นเพื่อคำนวณค่าความชื้นที่ 25 องศาเซลเซียส.....	94
4.11//ค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องเทียบกับค่าความชื้นจากเครื่องวัดมาตรฐาน.....	95
4.12//เครื่องวัดค่าความชื้น ไม้ต้นแบบ.....	95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.26 การวัดความชื้นของไม้ตัวอย่าง.....	87
3.27 ไม้ตัวอย่างที่นำมาวัดค่าความชื้น.....	87
4.1 สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตจากวงจร โพรบวัด.....	90
4.2 สัญญาณจากเครื่องวัดเมื่อไม้ความชื้น 8 % และ 26 %.....	90
4.3 ความคลาดเคลื่อนของความต่างศักย์เนื่องจากอุณหภูมิ.....	91
4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์จากชุดเซนเซอร์แบบที่ 1เทียบกับอุณหภูมิ.....	92
4.5 สัญญาณที่มอดูเลตแล้วซึ่งวัดจากปลายหัวโพรบ.....	92
4.6 สัญญาณความถี่สูง 15 kHz ที่อยู่ภายในสัญญาณความถี่ต่ำตัวพา 500 Hz.....	93
4.7 ความจุไฟฟ้าของอากาศเทียบกับอุณหภูมิ.....	93
4.8 ความจุไฟฟ้าของไม้ที่มีความชื้น 7 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 25-55 องศาเซลเซียส.....	93
4.9 ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับค่าความชื้นของไม้พาลาทที่อุณหภูมิ 25-55 องศาเซลเซียส.....	94
4.10 การประมาณค่าสมการเชิงเส้นเพื่อคำนวณค่าความชื้นที่ 25 องศาเซลเซียส.....	94
4.11 ค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องเทียบกับค่าความชื้นจากเครื่องวัดมาตรฐาน.....	95
4.12 เครื่องวัดค่าความชื้น ไม้ต้นแบบ.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ค่าความชื้นของไม้เป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากในอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้จำเป็นที่จะต้องทำการวัดค่าความชื้นใน ไม้เนื่องจากค่าความชื้นเป็นสิ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านอื่นของไม้ทั้งคุณสมบัติด้านทานการเกิดเชื้อรา คุณสมบัติทางกล ค่าการติดกาวและจำเป็นต้องทราบก่อนที่จะนำไม้ไปใช้งานได้ อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพประกอบกับเครื่องวัดความชื้นในไม้ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีราคาแพงดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบสร้างเครื่องวัดความชื้นในไม้ขึ้นมาเพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตเป็นการสร้างเครื่องมือเพื่อวิเคราะห์ห้ขึ้นมาใช้เองในราคาต้นทุนต่ำ สามารถใช้วัดค่าได้ถูกต้องและสะดวกต่อการใช้งานและเพื่อลดการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สร้างเครื่องมือวัดความชื้นที่สามารถวัดค่าได้ถูกต้องและสะดวกต่อการใช้งาน
2. สร้างเครื่องมือวัดความชื้นในไม้ราคาถูกเพื่อเป็นต้นแบบในการผลิต
3. เป็นการลดต้นทุนการนำเข้าเครื่องมือวัดจากต่างประเทศ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

สามารถสร้างเครื่องวัดความชื้นในไม้ เพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตได้

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎี เครื่องวัดความชื้นในไม้
2. เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองเพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างเครื่องวัดความชื้นในไม้
3. ทดลองเพื่อเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการวัดค่าทางไฟฟ้า
4. สร้างแผงวงจรต้นแบบของเครื่องวัดความชื้นในไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับวัดค่าในการทดลอง
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง
7. ทดสอบและแก้ไขตัวโปรแกรมสำหรับวัดความชื้นในไม้แต่ละชนิด
8. แก้ไขโปรแกรมและเขียนฟังก์ชันการทำงานของเครื่อง
9. ประกอบตัวเครื่องต้นแบบในการผลิต
10. เปรียบเทียบค่ากับเครื่องมือวัดความชื้นไม้ที่เป็นมาตรฐาน
11. นำเสนอผลงานการวิจัย
12. เขียนเล่มรายงานการวิจัย
13. ตรวจสอบและแก้ไข
14. ส่งรายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจหลักการทำงานเครื่องวัดความชื้นในไม้
2. สามารถสร้างเครื่องวัดความชื้นในไม้ขึ้นมาใช้เองได้ในราคาถูก
3. เป็นการลดต้นทุนการนำเข้าเครื่องมือวัดจากต่างประเทศ

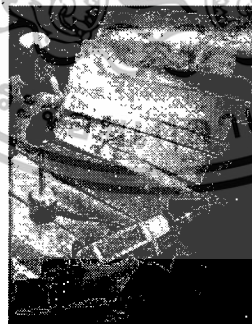
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของการวัดค่าความชื้นไม้

ค่าความชื้นเป็นตัวบอกระดับปริมาณน้ำในเนื้อวัสดุซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ต้องการวัดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เพราะความชื้นมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุทั้งการยืดหดตัว ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ในอุตสาหกรรมอาหารความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญที่บอกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาในการเก็บรักษา ทางการเกษตรความชื้นมีส่วนสำคัญต่อการเก็บรักษาผลผลิต การต้านทานเชื้อราในเมล็ดพืช อัตราการงอกของเมล็ดพืชรวมถึงความชื้นในดินก็มีส่วนต่อการเจริญเติบโตของพืชด้วย ทางอุตสาหกรรมวิชาการวัดความชื้นของบรรยากาศมีความจำเป็นสำหรับการพยากรณ์สภาพภูมิอากาศ และเป็นตัวแปรในการกำหนดสภาพอากาศในแต่ละพื้นที่ ในอุตสาหกรรมป่าไม้ความชื้นเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของไม้ การหดตัวและพองตัวของไม้ ความต้านทานต่อแมลง ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบความชื้นของไม้ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ในห้องปฏิบัติการความชื้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะต้องทำการวัดเพราะค่าความชื้นจะมีผลต่อการศึกษาคุณสมบัติและใช้ประกอบกับข้อมูลอื่นๆเพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติ พฤติกรรม การเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในทางเคมีและชีววิทยา ด้านล่างแสดงเครื่องวัดความชื้นที่ใช้วัดความชื้นในเนื้อไม้



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างเครื่องวัดความชื้นในไม้

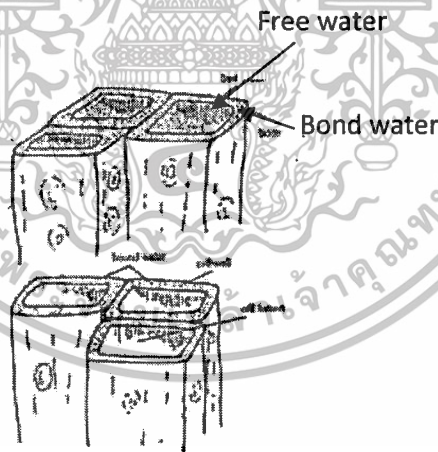
2.1.2 คุณสมบัติของไม้ (Wood properties)

การที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์จะต้องทราบคุณสมบัติของไม้เพื่อจะเลือกใช้ไม้ให้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทซึ่งคุณสมบัติของไม้ประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความหนาแน่น (Density) หมายถึงมวลของไม้ต่อปริมาตร ค่าโดยปกติค่าความหนาแน่นของไม้จะวัดที่ความชื้นเท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์

- ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) หมายถึง น้ำหนักอบแห้งของเนื้อไม้หารด้วยน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของไม้เมื่ออบแห้งแล้วหรือเมื่อไม้สด มีหลายปัจจัยที่ทำให้ไม้มีความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะไม่เท่ากันได้แก่ สภาพภูมิอากาศที่ไม้เจริญเติบโต สภาพภูมิประเทศ ชนิดของไม้ ความชื้น อุณหภูมิ กระ皮และแก่น อัตราการเจริญเติบโต สารแทรก เป็นต้น ความชื้น (Moisture content) ความชื้นในเนื้อไม้ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการนำไม้ไปใช้ประโยชน์ความชื้นในเนื้อไม้แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์ (Bound water) และน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างภายในเซลล์ (Free water) การแห้งตัวของไม้จะเริ่มจากน้ำในช่องว่างภายในเซลล์จะลดลงก่อนปริมาณความชื้นในไม้ขณะที่ผนังเซลล์ยังมีน้ำอึดตัวอยู่แต่น้ำที่ช่องว่างภายในเซลล์แห้งหมดแล้วเรียกว่าจุดหมาด (Fiber saturation point, FSP) ซึ่งเป็นจุดที่สำคัญเพราะมีน้ำในช่องว่างภายในเซลล์เท่านั้นที่มีผลต่อน้ำหนักของไม้แต่น้ำในผนังเซลล์จะมีผลต่อการหดตัวและพองตัวของไม้จุดหมาดของไม้จะมีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 20-30 เปอร์เซ็นต์ ด้านล่างแสดงน้ำภายในเซลล์และน้ำที่ผนังเซลล์



ภาพที่ 2.2 น้ำภายในเซลล์และน้ำที่ผนังเซลล์

2.1.3 การพิจารณาค่าความชื้นในไม้

ค่าความชื้นในไม้จะพิจารณาจากปริมาณน้ำในเนื้อไม้ขณะเปียกเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำในเนื้อไม้ขณะที่แห้งแล้วโดยทั่วไปนิยมวัดน้ำหนักโดยค่าที่วัดได้จะเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้งของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้ปัจจุบันมีเครื่องมือที่สามารถความชื้นของไม้โดยสามารถบอกค่าออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักแห้ง ซึ่งโดยธรรมชาติของไม้แล้วจะมีน้ำอยู่ภายในเซลล์เพื่อหล่อเลี้ยงต้นไม้ซึ่งน้ำหนักของน้ำภายในเซลล์เหล่านี้อาจจะมากกว่าน้ำหนักของเซลล์ไม้ หลังจากตัดต้นไม้มาใช้งานไม้จะเริ่มสูญเสียน้ำออกจากเซลล์โดยจะมีการคายน้ำออกมาอย่างรวดเร็วในตอนแรกและจะค่อยๆลดอัตราการคายน้ำลง ซึ่งหากปล่อยให้ไม้แห้งเองตามธรรมชาติอาจจะต้องใช้เวลามากกว่าจะสามารถนำไม้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยการหัดตัวของไม้จะเริ่มขึ้นเมื่อไม้มีความชื้นประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์และจะเริ่มหัดตัว จนกว่าจะไม่มีน้ำความชื้นภายในไม้เลยในทางอุตสาหกรรมจึงนิยมนำไม้มาอบเพื่อไล่ความชื้นและให้ทันต่อความต้องการในการใช้งาน มีการทำอุตสาหกรรมไม้กันอย่างกว้างขวาง มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่ทำจากไม้โดยมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากไม้พบว่ามียอดการเติบโตที่สูง โดยจะสังเกตได้จากข้อมูลทางสถิติ

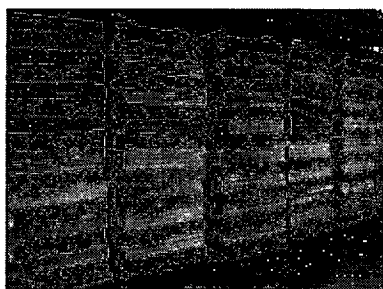
ลำดับ	สินค้า	2541	2542	2543	2544
1.	เฟอร์นิเจอร์ไม้	17,766.1	21,682.1	27,833.2	20,240.0
2.	ผลิตภัณฑ์ไม้	11,976.4	12,301.6	14,130.5	11,047.8
	2.1 เครื่องใช้ทำด้วยไม้	3,731.8	3,574.3	3,574.3	3,426.7
	2.2 กรอบไม้	207.2	208.0	223.6	153.7
	2.3 รูปแกะสลัก, เครื่องประดับ	136.0	141.3	169.0	205.0
	2.4 อุปกรณ์ก่อสร้างทำด้วยไม้	468.9	691.4	4,851.6	635.7
3.	ไม้และผลิตภัณฑ์ไม้แผ่น	4,513.3	6,880.6	9,294.4	7,525.4
	3.1 ไม้แปรรูปเป็นแผ่นหนาเกิน 6 มิลลิเมตร	472.4	1,418.8	2,211.5	1,638.7
	3.2 แผ่นไม้วีเนียร์	471.5	374.1	336.1	289.2
	3.3 ไม้และไม้แผ่นอื่นๆ	1,908.3	3,163.8	4,397.5	3,499.7
	รวม	41,651.9	50,435.7	63,934.2	48,661.9
4.	กระดาษเยื่อกระดาษและผลิตภัณฑ์	16,346.0	15,691.4	17,603.7	14,523.6
	รวม	57,997.9	66,397.1	81,537.9	63,135.5

ตารางที่ 2.1 สถิติการส่งออกอุตสาหกรรมที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 อุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ (Lumber recovery)

การแปรรูปไม้เป็นการนำไม้มาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้ ขนาด คุณสมบัติตามที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ โรงงานแปรรูปไม้จะรับไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยทำการซังน้ำหนักหรือวัดปริมาตรของไม้ก่อน โดยพิจารณาจากไม้ 1 ต้นจะมีปริมาตรเท่ากับ 1.30 ลบ.ม. เมื่อไม้เข้าสู่โรงงานจะแปรรูปและนำไม้เข้าอัดน้ำยาและสารเคมีป้องกันแมลงและเชื้อราโดยใช้น้ำยาพวกบอเรตหรือโบรอนอัดเข้าเนื้อไม้แบบเต็มเซลล์ก่อนทำการอบไม้ในการอัดน้ำยาจะใช้น้ำยาพวก Timbor , Boric, Borax, Cellbor ใช้เวลาในการอัดน้ำยา 1-2 ชั่วโมง โดยใช้ความดัน 150-200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หลังจากผ่านการอบน้ำยามาแล้วจะนำไม้เข้าเตาอบซึ่งส่วนใหญ่มักจะเป็นเตาอบแบบไอน้ำโดยจะอบไม้ให้ได้ความชื้น 8-12 เปอร์เซ็นต์ใช้เวลาในการอบประมาณ 7-15 วันซึ่งจะขึ้นกับความหนา ขนาดเตาและความชื้นของไม้ก่อนเข้าเตาอบ ขณะทำการอบจะมีการวัดความชื้นของไม้ด้วยหลังจากผ่านกระบวนการอบและรักษาเนื้อไม้แล้วจะถูกไสผิวหน้าให้เรียบก่อนการนำไปผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพไม้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการอัดน้ำยาเคมีเข้าไปในเนื้อไม้ให้ได้ปริมาณตามมาตรฐานและเพียงพอในการป้องกันเชื้อราและแมลงทำลายเนื้อไม้ในการทดสอบจะผสมสารเคมี Chrome Azurol S powder, Anhydrous ,Sodium Acetate และน้ำกลั่นบริสุทธิ์ละลายให้เข้ากันจากนั้นจะทำการไสผิวหน้าไม้ที่จะทำการทดสอบแล้วใช้น้ำยาเคมีทาตรงบริเวณผิวหน้าไม้ที่ไสจากนั้นทิ้งไว้แล้วสังเกตสีที่เปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสีจะเป็นตัวบอกถึงปริมาณน้ำยาเคมีที่เราอัดเข้าไปในเนื้อไม้ยังความเข้มมากแสดงว่าน้ำยาเคมีที่เราอัดซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดีหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งและวัดความชื้นแล้วไม้ก็จะถูกนำไปใช้งานเพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น เฟอร์นิเจอร์ ผลิตภัณฑ์ไม้เช่นกรอบรูป เครื่องใช้ไม้แผ่น ของเล่นเด็ก เชื้อเพลิง เชื้อกระดาษ ฯลฯ



ภาพที่ 2.3 อุตสาหกรรมการแปรรูปไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ผลของค่าความชื้นต่อคุณสมบัติของไม้

- กลสมบัติของ ไม้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของ ไม้ลดลง กลสมบัติ ได้แก่ ค่าความแข็ง ความถ่วงจำเพาะ ความเหนียวจากการตัดด้านล่างแสดงค่ากลสมบัติของ ไม้แต่ละชนิด

ชนิดของไม้	ความ ชื้น (%)	ความ ถ่วง จำ เพาะ	ความแข็งแรง			ความ ดี x100	ความ เหนียว จากการ เคาะ	ความ แข็ง กก.
			การ ตัด	การ บีบ	การ เขียด			
1. ตะเคียนทอง (Hopea odorata Roxb.)	12	0.80	1,172	520	148	1,202	4.70	649
2. พนอง (Shorea hypochra Hance)	14	0.59	940	489	138	1,026	2.90	443
3. ยาง (Dipterocarpus sp.)	13	0.70	888	394	164	902	2.14	470
4. สยาขาว (Shorea Leprosula Miq.)	12	0.51	846	428	106	992	4.02	336
5. สยาแดง (Shorea curtisii Dyer)	11.8	0.41	817	429	74	668	1.71	222
6. ตะเคียนขน (Hopea minutiflora Fisch.)	10.2	0.62	958	513	159	922	1.55	474
7. ยางเสียน (Dipterocarpus costatus)	12	0.83	1,440	661	177	1,333	4.03	772
8. พันจา (Vatica cinerea King)	12	1.06	1,960	866	258	1,853	4.92	1270
9. หลวง (Dipterocarpus tuberculatus Roxb.)	12	0.86	1,297	552	152	1,319	3.34	734
10. รัง (Pentacme suavis A.DC.)	12	1.00	1,352	621	126	1,431	3.42	755
11. เหยง (Dipterocarpus obtusifolius Teijsm.)	12	0.90	1,200	580	131	1,355	3.00	716
12. แฉ็ก (Shorea glauca King)	13	0.78	1,497	532	151	1,370	4.80	723
13. ตะเคียนทราย (Shorea gratissima Dyer.)	12.4	0.76	1,243	560	-	1,243	3.46	744
14. ยุง (Dipterocarpus grandiflorus BI.)	13	0.76	1,150	490	176	1,120	2.88	555
15. ชันฟู (Hopea recopei Pierre)	47.4	1.23	1,226	518	133	1,260	5.47	586
16. หงอนไก่หลังขาว (Hopea helferi Brandis)	20.3	0.97	1,162	526	205	1,200	6.74	787
17. กะบาก (Anisoptera oblonga Dyer)	12	0.60	656	384	96	1,061	3.57	336
18. ไช้เขียว (Parashorea stellata Kurz)	12	0.54	909	459	105	1,136	1.98	382

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

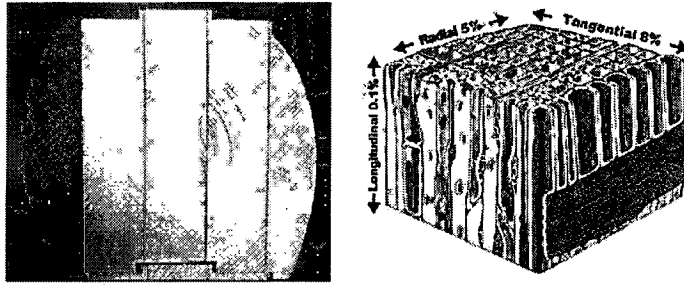
19.	เคี่ยม	(Cotylelobium lanceolatum Craib)	12	0.91	1,489	707	196	1,489	4.01	992
20.	เคี่ยมคenang	(Shorea sericeiflora Fisch & Hutch.)	12	0.72	1,438	602	158	1,434	4.02	683
21.	ชัน	(Shorea thorelii Pierre)	12	0.84	1,341	630	149	1,623	4.37	687
22.	ตะเคียนชันดาแมว	(Balanocarpus heimii King)	12	0.90	1,753	760	180	1,784	4.34	830
23.	ตะเคียนราก	(Hoepa avellanea Heim)	12	0.70	1,166	584	186	1,296	3.13	646
24.	ตะเคียนหิน	(Hoepa ferrea Pierre)	12	0.98	1,609	679	191	1,650	3.25	1142
25.	เต็ง	(Shorea obtusa Wall.)	12	1.05	1,732	723	143	1,751	6.10	964
26.	พะยอม	(Shorea talura Roxb.)	9.74	0.84	1,170	682	193	1,581	3.76	667

ตารางที่ 2.2 ค่ากลสมบัติของไม้แต่ละชนิด

- ความทนทานต่อแมลงและเห็ดราจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลงโดยทั่วไปไม้ที่มีความชื้นน้อยจะมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมดีกว่า ไม้ที่ขึ้นมากแมลงจะเข้าทำลายไม้ได้ยากเพราะไม้มีความแข็งเพิ่มขึ้นอีกประการหนึ่งเมื่อไม้มีความชื้นน้อยจะทำให้สภาพของไม้ไม่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของเห็ดราทำให้เกิดราได้ยากขึ้น
- ค่าการติดกาวจะดีขึ้น เมื่อค่าความชื้นของ ไม้ลดลงเนื่องจากกาวส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นกาวที่อาศัยการแพร่กระจายไปบนผิวของไม้กลไกการติดกาวจะเกิดขึ้นจากการระเหยหรือสูญเสียดังกล่าวจะออกจากแนวกาว ดังนั้นเมื่อไม้มีความชื้นสูงจะต้องใช้เวลาในการติดกาวนานเพราะน้ำในแนวกาวจะถูกดูดซึมเข้าสู่เนื้อไม้ได้ช้าลงและทำให้เนื้อกาวในแนวกาวเข้าสู่เนื้อไม้มากขึ้นทำให้เนื้อกาวในแนวกาวมีน้อยเกิดรอยต่อไม่แน่น
- การหดตัวและพองตัวเมื่อไม่มีการสูญเสียจากผนังเซลล์จะทำให้ไม้หดตัว ในทางตรงกันข้ามเมื่อไม่มีปริมาณน้ำในผนังเซลล์เพิ่มขึ้นในระดับที่ต่ำกว่าจุดหมาดไม้ก็จะเกิดการพองตัวการหดตัวและพองตัวของจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไม้ในช่วงที่ต่ำกว่าจุดหมาด การหาค่าการหดตัวและพองตัวของเนื้อไม้หาได้จาก

$$\text{การหดตัว, การพองตัว (เปอร์เซ็นต์)} = (\text{ขนาดหรือปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง}) \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นด้วยกับเงื่อนไขการใช้งานค่า
ขนาดหรือปริมาตรที่เริ่มต้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 การหดตัวและพองตัวของไม้ด้านต่างๆ

การหดตัวเฉลี่ยของไม้ของไม้แต่ละชนิดตั้งแต่ไม้สดจนถึงไม้ที่อบแห้งจะพิจารณาการหดตัว 3 ด้าน คือ การหดตัวตามรัศมี การหดตัวตามเส้นสัมผัสอัตราส่วนของการหดตัวทั้ง 2 แนว ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลการหดตัวของไม้

Wood Species	% Radial Shrinkage	% Tangential Shrinkage	Tangential/Radial
Alder, Red	4.4	7.3	1.7
Ash, Black	5.0	7.8	1.6
Ash, Blue	3.9	6.5	1.7
Ash, Green	4.6	7.1	1.5
Ash, Oregon	4.1	8.1	2.0
Ash, White	4.9	7.8	1.6
Aspen, Bigtooth	3.3	7.9	2.4
Aspen, Quaking	3.5	6.7	1.9
Basswood	6.6	9.3	1.4
Beech, American	5.5	11.9	2.2

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการหดตัวเฉลี่ยของไม้แต่ละชนิด

- ค่าความชื้นสมดุล เมื่อไม้ถูกปล่อยให้อยู่ในสถานะของอากาศไม้ก็จะปรับตัวให้ความชื้นมีค่าสมดุลกับความชื้นในบรรยากาศปริมาณนี้เป็นความชื้นสมดุลในการที่จะลดการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไม้ให้น้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ลดการเปลี่ยนแปลงขนาดของไม้ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวและพองตัวของไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงต้องพิจารณาความชื้นสมดุลประกอบกันด้วย โดยประเทศไทยจะมีความชื้นสมดุลอยู่ในช่วง 8-12 เปอร์เซ็นต์ ในการเลือกไม้กับงานในสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกันนั้นจะมีการพิจารณาค่าความชื้นของไม้ประกอบกันด้วย ดังข้อมูลที่แสดงค่าความชื้นของไม้ที่ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์ในแต่ละสถานที่ เช่น บริเวณภายนอกอาคารค่าความชื้นโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 16-20 เปอร์เซ็นต์ ภายในอาคารจะอยู่ที่ 12-15 เปอร์เซ็นต์ และในพื้นที่อากาศแห้งแล้งความชื้นจะลดลง 11-12 เปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดเกินกว่า 4 เปอร์เซ็นต์

2.1.6 การหาค่าความชื้นของเนื้อไม้

สามารถหาได้ 2 วิธี คือ

- การอบแห้ง (Overdry Method) ทำโดยการนำไม้มาชั่งน้ำหนักก่อนแล้วบันทึกค่าไว้จากนั้นก็ให้นำไม้ไปอบแห้งแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบแล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความชื้น

$$MC = \left(\frac{W_m - W_0}{W_0} \right) \times 100$$

เมื่อ MC คือ ปริมาณความชื้นมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

W_m คือ น้ำหนักของไม้ที่มีความชื้น

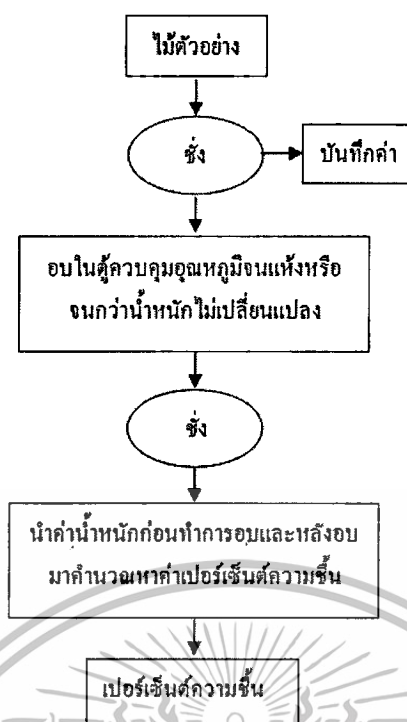
W_0 คือ น้ำหนักแห้งของไม้

- การใช้เครื่องวัดความชื้น เครื่องวัดความชื้นมีหลายแบบทั้งแบบที่มีขั้วโพรบ 2 อันสำหรับกดลงไปบนเนื้อไม้ และแบบที่ต้องสัมผัสกับผิวไม้ แบบที่ไม่ต้องสัมผัสผิว เป็นต้น

2.1.7 หลักการของเครื่องวัดค่าความชื้นในไม้

การวัดค่าความชื้นทางตรงจะอาศัยการอบแล้วพิจารณาค่าน้ำหนักก่อนอบและหลังอบเพื่อนำมาใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น เนื่องจากความชื้นเป็นปริมาณน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของไม้ทั้งหมดการวัดค่าความชื้นสามารถทำได้ดังนี้

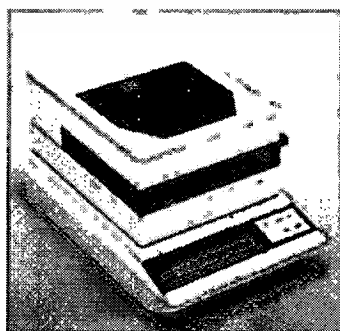
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการหาค่าความชื้น โดยการอบแห้ง

ตัวเครื่องวัดความชื้นแบบโดยตรงนี้จะออกแบบให้สามารถวัดค่าและควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้โดยจะประกอบด้วย

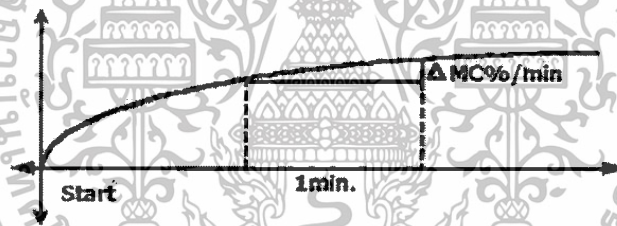
1. เครื่องชั่งละเอียด
2. อุปกรณ์ให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
3. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิ ตั้งเวลา ประมวลผลผลการทำงาน แสดงค่าความชื้นและอุณหภูมิขณะเครื่องวัดค่า



ภาพที่ 2.6 เครื่องวัดความชื้น โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทำงานเมื่อใส่ตัวอย่างที่บดละเอียดแล้วลงไปในตัวเครื่องจะทำการชั่งน้ำหนักแล้วระบบประมวลผลจะทำการบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้นไว้จากนั้นวงจรควบคุมจะเริ่มให้ความร้อนอุปกรณ์ให้ความร้อนนี้ ได้แก่ หลอดอินฟราเรด หลอดฮาโลเจนหรือคลื่นไมโครเวฟ การเพิ่มอุณหภูมินี้สามารถกำหนดได้หลายแบบทั้งแบบที่เพิ่มอุณหภูมิให้ถึงค่าที่กำหนดแบบรวดเร็วและแบบที่ค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิจนกว่าจะถึงจุดที่กำหนด หรือเพิ่มความร้อนขึ้นเป็นแบบขั้นบันได เมื่อเริ่มให้ความร้อนกับตัวอย่าง น้ำหนักของตัวอย่างจะเริ่มลดลงตลอดเวลาส่วนประมวลผลจะทำการเก็บค่าน้ำหนักที่ลดลงเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ชั่งได้ในตอนแรกและคิดคำนวณออกมาเป็นค่าความชื้นตลอดเวลา เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความชื้นที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกอัตราการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อตัวอย่างเริ่มแห้งอัตราการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะเพิ่มขึ้นช้าลงและคงที่ในที่สุดเมื่อตัวอย่างแห้งสนิท ตัวเครื่องสามารถเลือกฟังก์ชันการทำงานให้หยุดทำงานเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่าที่กำหนดเพื่อลดระยะเวลาในการทดสอบ



ภาพที่ 2.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

ข้อดีของเครื่องวัดความชื้นแบบวัดได้โดยตรง

1. ใช้เวลาในการทดสอบน้อย
2. สามารถวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้สะดวก
3. ใช้พลังงานน้อย

ข้อเสีย

1. สามารถทดสอบตัวอย่างได้เพียงครั้งละตัวอย่างเท่านั้น

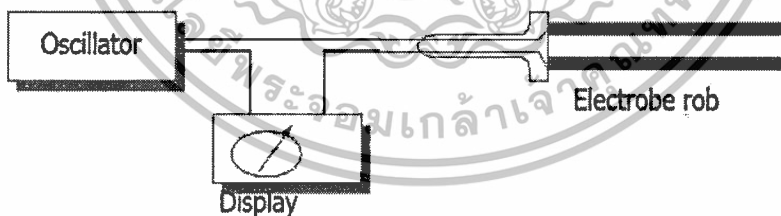
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบต้องทำการบดก่อนเข้าเครื่อง
3. การใช้งานจะต้องระมัดระวังเนื่องจากมีส่วนประกอบของเครื่องซึ่งละเอียดรวมอยู่ด้วย
4. มีราคาแพง

2.1.8 การวัดค่าความชื้นโดยอ้อม

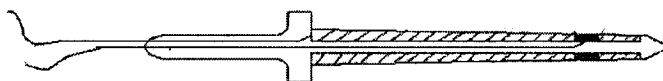
- การวัดค่าความชื้นโดยใช้หลักการค่าความนำไฟฟ้า ประกอบด้วยวงจรกำเนิดความถี่ที่มีค่าความถี่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ ป้อนให้กับขั้วโลหะ 2 ขั้วที่มีระยะห่างคงที่ เมื่อนำขั้วโลหะทั้งสองมาสัมผัสกับไม้ สัญญาณไฟฟ้าจะไหลผ่านไม้ได้มากถ้ามีความชื้นมาก จะนำไฟฟ้าได้ดี ถ้ามีความชื้นน้อยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านได้น้อยลง ปริมาณของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับค่าความชื้นของไม้จะนำค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้านี้มาทดสอบเปรียบเทียบเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ เครื่องแบบนี้จะแบ่งตามชนิดของขั้วอิเล็กโทรดได้ 3 แบบคือ

1. แบบแท่งอิเล็กโทรดแยกกัน ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเป็นแท่งโลหะไร้สนิมยาวประมาณ 30 เซนติเมตร วางห่างกันประมาณ 2 - 3 เซนติเมตร มีด้ามจับทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เวลาใช้จะแท่งหรือเสียบแท่งอิเล็กโทรดทั้งสองเข้าไปในเนื้อวัสดุตัวอย่างที่ต้องการวัด



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบเครื่องวัดความชื้นแบบอิเล็กโทรดแยก

2. แบบแท่งอิเล็กโทรดร่วม ใช้งานเหมือนแบบ แท่งอิเล็กโทรดแยกแต่มีข้อเสียก็คือแท่งจะ โดกว่าเสียบเข้าไปในวัสดุตัวอย่างที่จะทดสอบยากและเกิดรูใหญ่กว่า

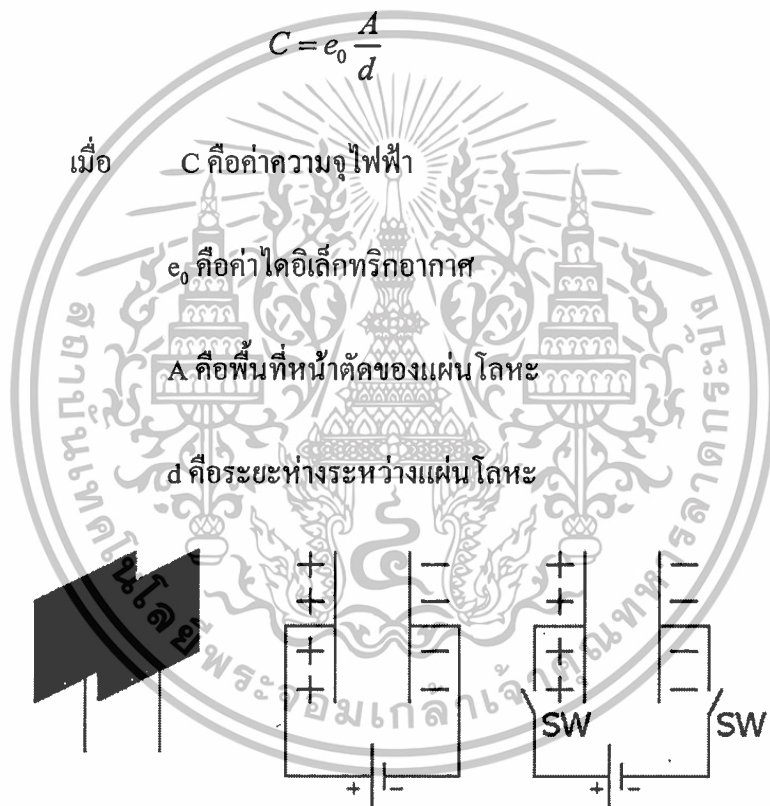


ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบเครื่องวัดความชื้นแบบอิเล็กโทรดร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบวัดค่าความชื้นของไม้โดยอาศัยหลักการค่าไดอิเล็กตริกของสาร

เมื่อนำแผ่นโลหะ 2 แผ่นมาวางใกล้กัน จะทำให้เกิดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรียกว่าตัวเก็บประจุ เมื่อนำแบตเตอรี่มาแตะที่แผ่นโลหะทั้งสองประจุไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะมาสะสมที่แผ่นโลหะและเมื่อเอาแบตเตอรี่ออกไป แผ่นโลหะทั้งสองก็ยังมีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ แผ่นโลหะทั้งสองที่วางใกล้กันนี้จึงกลายเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เราเรียกว่าตัวเก็บประจุ ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของแผ่นโลหะทั้งสอง จะได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ขนาดของแผ่นโลหะ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะและค่าไดอิเล็กตริกตรงกลางที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง



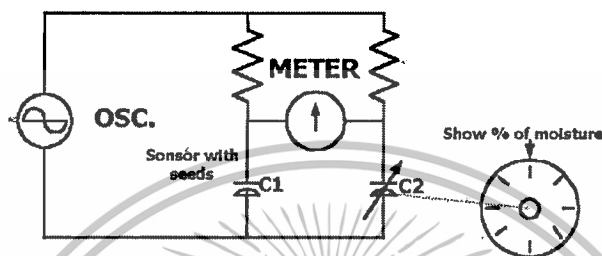
ภาพที่ 2.10 แบบโครงสร้างหัวโพรบวัดค่าไดอิเล็กตริก

เมื่อเรานำตัวอย่างที่จะทดสอบใส่ลงระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง จะได้ตัวเก็บประจุที่มีตัวอย่างที่จะทดสอบเป็นไดอิเล็กตริกแทนที่อากาศและเราพบว่าถ้า ตัวอย่างมีความชื้นมากค่าไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นหรือค่าความจุของตัวเก็บ ประจุจะเพิ่มขึ้น จากหลักการนี้ เราสามารถนำมาออกแบบเป็นเครื่องมือวัดความชื้นได้

ส่วนประกอบของเครื่องจะประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรกำเนิดความถี่สูง
2. ขั้วโลหะที่เป็นแผ่นตัวนำไฟฟ้า
3. ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการแสดงผล



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างวงจรเครื่องวัดความชื้นอย่างง่าย

C1 คือตัวเก็บประจุที่จะที่เกิดจากการนำเอาตัวอย่างที่จะทดสอบวางไว้ระหว่างแผ่นเพลทตัวนำทั้งสองค่าของตัวเก็บประจุจะแปรผันตรงกับค่าความชื้นในวัสดุ C2 คือตัวเก็บประจุอีกตัวหนึ่งที่ปรับเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าหรือลดค่าความจุไฟฟ้าได้ ใช้สำหรับเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้ากับ C1 ถ้า C1 และ C2 มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันเข็มของ มิเตอร์จะชี้อยู่ตรงกลาง แต่ถ้าค่าความจุไฟฟ้าของ ตัวเก็บประจุ C1 จะเพิ่มหรือลดตามความชื้นของตัวอย่างทดสอบเข็มมิเตอร์จะไม่ชี้ตรงกลางเราจะปรับค่าความจุของตัวเก็บประจุ C2 ให้มีค่าเพิ่ม หรือลดเท่ากับตัวเก็บประจุ C1 เมื่อค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันเข็มมิเตอร์จะชี้ตรงกลางเหมือนเดิมที่แกนหมุนของตัวเก็บประจุ C2 จะต่อกับหน้าปัดแสดงตัวเลขเปรียบเทียบแสดงค่าเป็นความชื้นเมล็ดพืชได้ เครื่องวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุนี้ มีข้อดีตรงที่ว่าสามารถวัดความชื้นได้รวดเร็ว ตัวอย่างทดสอบไม่เสียหาย

2.1.9 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อความแม่นยำในการวัดความชื้น

เนื่องจากเครื่องที่วัดหาค่าปริมาณความชื้นของตัวอย่างทดสอบได้โดยอ้อมนั้นมักใช้การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างทดสอบนั้นๆมาเทียบกับค่าความชื้นที่ควรวัดได้ โดยปกติแล้วคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างทดสอบนั้นจะเปลี่ยนไปตาม อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ไม่ว่าจะอาศัยคุณสมบัติทางเอกสารเป็นเอกสารทลวงวันเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็ตามนั้น เมื่อนุญาดเห็นาเบเซบระเยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าใดๆตัวอย่างนั้นก็ตาม เช่น ถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างสูงขึ้นจะทำให้ตัวอย่างนั้นมีความนำไฟฟ้าสูงขึ้น หรือมีความต้านทานต่ำลง และมีค่าไดอิเล็กตริกสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นเครื่องวัดความชื้นที่ดีจะต้องมีส่วนที่ทำหน้าชดเชยค่าความชื้นที่อ่านได้อันเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2.2 ทฤษฎีคลื่นสนามไฟฟ้า

2.2.1 สมการกฎของคูลอมบ์

พื้นฐานทางด้านไฟฟ้าและจากการวิเคราะห์เวกเตอร์เพื่อการวิเคราะห์และอธิบายปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าจากทฤษฎีของสนามไฟฟ้าสถิตย์ที่อยู่ภายในที่ว่างอิสระสนามเหล่านี้สามารถพบได้ในธรรมชาติซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์กับอากาศและบรรยากาศของกาชชนิดอื่นๆ จากการที่คูลอมบ์ได้ค้นพบว่าแรงกระทำระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นที่อยู่ในสุญญากาศหรือในที่ว่างสุญญากาศที่วางอยู่ห่างกันในระยะที่มากกว่าขนาดของวัตถุทั้งสองนั้นหลายๆจะมีค่าแปรผันตรงกับค่าของวัตถุทั้งสองและแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสองยกกำลังสอง ตามสมการ

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2}$$

เมื่อ Q_1 และ Q_2 คือค่าประจุของประจุทั้งสองส่วน R คือระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง k เป็นค่าคงที่ Q มีหน่วยเป็นคูลอมบ์และ R มีหน่วยเป็นเมตร แรงจะมีหน่วยเป็นนิวตัน ค่าคงที่ของ k มีค่าเท่ากับ

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

ค่า ϵ_0 เป็นค่าความยินยอมทางไฟฟ้าของที่ว่างอิสระ มีค่าเท่ากับ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$

และจากกฎของคูลอมบ์จะทำให้ได้ค่าของสมการเป็น

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

2.2.2 ความเข้มสนามไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาประจุที่วางอยู่ ณ ตำแหน่งที่แน่นอนกำหนดให้ประจุนั้นเป็น Q_1 เมื่อเคลื่อนประจุที่สองเข้าไปใกล้ๆกับประจุตัวแรกจะเกิดแรงที่กระทำต่อประจุที่สองตลอดทุกทิศทางที่ประจุเคลื่อนที่ไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจกล่าวได้ว่าประจุตัวที่สองเป็นตัวทดสอบสนามของแรงที่ปรากฏอยู่ ซึ่งจะทำได้หาแรงที่ประจุทดสอบโดยกฎของคูลอมบ์ได้

$$F_t = \frac{Q_1 Q_t}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_{1t}$$

$$\frac{F_t}{Q_t} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_{1t}$$

ทางด้านซ้ายของสมการจะเป็นฟังก์ชันของ Q_1 มีทิศทางเดียวกับเส้นเชื่อมระหว่างประจุ Q_1 กับประจุทดสอบสมการข้างต้นเป็นการอธิบายถึงเวกเตอร์สนามเรียกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity)

ความเข้มสนามไฟฟ้าคือเวกเตอร์ของแรงต่อหน่วยประจุทดสอบที่ไม่ได้ทำการวัดจากการทดลองโดยหาค่าของแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบขนาด 1 คูลอมบ์

สมการของสนามไฟฟ้าคือ

$$E = \frac{F_t}{Q_t}$$

$$E = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_{1t}$$

สมการความสัมพันธ์ของความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นความสัมพันธ์ของความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุแบบจุดเดี่ยว Q_1 ที่วางในสุญญากาศ ในการหาค่าความสัมพันธ์ของความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับประจูปแบบอื่นๆสามารถแยกพิจารณาได้แตกต่างออกไป ในกรณีของประจุแบบจุดเดี่ยวจะได้

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_R$$

เมื่อ R คือขนาดของเวกเตอร์ R ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ชี้ตรงจากจุดที่วางประจุ Q_1 ไปถึงตำแหน่งหรือจุดที่พิจารณาหาค่าสนามไฟฟ้า E และ a_R คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของเวกเตอร์ R เริ่มต้นการวิเคราะห์ด้วยการวางประจุ Q_1 ไว้ที่จุดกำเนิดของพิกัดทรงกลมเวกเตอร์หนึ่งหน่วย a_R จะเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวรัศมี a_r และ R ก็คือรัศมี r ของรูปทรงกลม ดังนั้น

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} a_r$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$E_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

จะพบว่ามีส่วนประกอบสนามในแนวรัศมีเพียงอย่างเดียวเพื่อให้เข้าใจเราจะใช้ความสัมพันธ์ของกำลังสองผกผัน(Inverse-square law) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของประจุ Q ที่จุดกำเนิดอยู่ในระบบพิกัดคาที่เขียนได้เป็น

$$R = r = xa_x + ya_y + za_z \text{ และ } a_R = a_r = (xa_x + ya_y + za_z) / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

ดังนั้น

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} a_x + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} a_y + \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} a_z \right)$$

หาไม่มีการวิเคราะห์ทางเวกเตอร์แล้ว ข้อมูลข้างต้นในสมการจำเป็นที่จะต้องแยกออกเป็น 3 สมการซึ่งแต่ละสมการจะใช้สำหรับแต่ละส่วนประกอบ เพื่อให้ได้สมการจะต้องแยกความเข้มสนามไฟฟ้าออกเป็น 3 ส่วนประกอบ โดยการหาภาพฉายของขนาดสนามในแต่ละแกนด้วยความสัมพันธ์ทางเวกเตอร์ หากพิจารณาประจุที่ไม่ได้วางที่จุดกำเนิดของระบบพิกัดใดๆ สนามจะไม่เป็นรูปทรงกลมสมมาตร(หรือไม่เป็นรูปทรงกระบอกกลมสมมาตร ถ้าไม่ได้ใส่ประจุเชิงเส้นบนแกน z) เราสามารถใช้ระบบคาที่เขียนสำหรับประจุ Q ที่วางไว้ที่ตำแหน่ง $r' = x'a_x + y'a_y + z'a_z$ ดังแสดงในรูปจะพบว่าตำแหน่งใดๆที่จุด $r = xa_x + ya_y + za_z$ หาได้โดยการแทน R ด้วย $r - r'$ จะได้

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 |r - r'|^3} \frac{r - r'}{|r - r'|} = \frac{Q(r - r')}{4\pi\epsilon_0 |r - r'|^3}$$

$$= \frac{Q[(x - x')a_x + (y - y')a_y + (z - z')a_z]}{4\pi\epsilon_0 [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{3/2}}$$

เราได้กำหนดเวกเตอร์ของสนามเป็นฟังก์ชันเวกเตอร์ของเวกเตอร์ตำแหน่งซึ่งจะเน้นโดยการให้เป็นสัญลักษณ์ในข้อกำหนดด้วย $E(r)$ สมการข้างต้นจึงกลายเป็นกรณีพิเศษซึ่ง $x' = y' = z' = 0$ เนื่องจากแรงคูลอมบ์เป็นเชิงเส้น ความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุแบบจุด 2 ประจุ Q_1 ที่วางอยู่ที่ตำแหน่ง r_1 และ Q_2 ที่วางอยู่ที่ตำแหน่ง r_2 คือผลบวกของแรงกระทำโดยลำพังบนประจุทดสอบ q ที่ได้รับจากประจุ Q_1 กับ Q_2 หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E(r) = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 |r-r_1|^2} a_1 + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 |r-r_2|^2} a_2$$

เมื่อ a_1 และ a_2 เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ชี้ทิศทางของ $(r-r_1)$ และ $(r-r_2)$ ตามลำดับ หากมีการใส่ประจุในตำแหน่งอื่นๆเพิ่มเข้าไปอีกค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุ n จุดจะมีค่าตามสมการ

$$E(r) = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 |r-r_1|^2} a_1 + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 |r-r_2|^2} a_2 + \dots + \frac{Q_n}{4\pi\epsilon_0 |r-r_n|^2} a_n$$

สมการสามารถเขียนให้สั้นลงด้วยวิธีการใช้เครื่องหมาย Σ สำหรับการบวกและจำนวนเต็มในการบวกเริ่มตั้งแต่ $m=1$ เทอมเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งถึง n เทอมดังนี้

$$E(r) = \sum_{m=1}^n \frac{Q_m}{4\pi\epsilon_0 |r-r_m|^2} a_m$$

2.2.3 สนามเนื่องจากประจุที่กระจายอย่างสม่ำเสมอในปริมาตรหนึ่ง

หากพิจารณาความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร (Volume charge density) ซึ่งค่าความหนาแน่นนี้เปรียบเสมือนการพิจารณาความหนาแน่นของน้ำ ที่ประกอบด้วยอะตอมและโมเลกุลกักบอณาภาคที่เป็นส่วนประกอบ ในการพิจารณานั้นก็ต้องการผลลัพธ์คือค่ากระแส ศักย์ไฟฟ้า ประจุในอุปกรณ์ไฟฟ้า เราแทนค่าความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตรด้วย ρ_v มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m^3) เมื่อพิจารณาประจุขนาดเล็ก ΔQ ภายในปริมาตรเล็กๆ Δv จะได้

$$\Delta Q = \rho_v \Delta v$$

สามารถนิยามค่า ρ_v ในทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยการใส่ขอบเขตจำกัดหรือลิมิต(Limiting process)ลงไปในสมการได้เป็น

$$\rho_v = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta v}$$

ดังนั้นค่าประจุมรวมภายในปริมาตรที่แน่นอนค่าหนึ่งสามารถหาได้จากการอินทิเกรตปริมาตรนั้นๆ

$$Q = \int \rho_v dv$$

2.2.4 สนามสำหรับเส้นประจุ(Field of line charge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุที่มีการกระจายปริมาตรเป็นเส้นเล็กๆ โดยเส้นประจุมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเรากำหนดให้ประจุเหล่านี้อยู่ในประเภทที่มีการกระจายเป็นประจุเชิงเส้นที่มีความหนาแน่นประจุต่อความยาวเป็น ρ_l C/m การวิเคราะห์ประจุที่มีการกระจายแบบเชิงเส้น โดยสมมติให้ประจุเส้นตรงวางอยู่ในแนวแกน z ในพิกัดทรงกระบอกเส้นประจุมีความยาวจาก $-\infty$ จนถึง ∞ ดังแสดงในรูปและสมมติให้สนามไฟฟ้า E ที่เกิดจากประจุเส้นนี้แผ่ออกมารอบๆ โดยเป็นสนามที่ที่ได้จากประจุเส้นยาวอย่างสม่ำเสมอมีความหนาแน่นต่อหน่วยความยาวเป็น ρ_l ข้อแรกเราจะพิจารณาความสมมาตรเพื่อใช้เป็นแนวทางในการคำนวณซึ่งจะมีส่วนประกอบเฉพาะ 2 ประการคือ(1) ด้วยพิกัดที่ใช้อยู่สนามจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงที่ระยะพิกัดคงที่(2)สนามในบางส่วนประกอบนั้นจะไม่มีค่า คำตอบของสองปัญหาจะเป็นตัวบอกว่าส่วนประกอบของสนามในพิกัดใดบ้างที่มีค่าและเปลี่ยนแปลงหรือเป็นศูนย์ หากสมมติเราเคลื่อนไหวไปรอบเส้นประจุโดยหมุนตามมุม ϕ ขณะที่รักษาระยะให้ ρ และ z คงที่จะมองเห็นเส้นประจุปรากฏอย่างเดิมในทุกๆมุมที่เปลี่ยนค่าไป หรือกล่าวได้ว่ามีความสมมาตรตามแนวตั้งแสดงว่าไม่มีสนามใดๆแปรตามมุม ϕ เมื่อทำซ้ำโดยการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ให้ ρ และ ϕ เป็นค่าคงที่บ้างแต่มีการเคลื่อนที่ขึ้นและลงตามแนวแกน z ผลที่ได้พบว่าเหมือนกันกับครั้งแรก ถ้ากำหนดให้ ϕ และ z คงที่แต่ให้มีการเคลื่อนที่ตามแนว ρ จะพบว่าค่าที่ได้เปลี่ยนแปลงไปสนามมีค่าลดลงเมื่อระยะตามแนว ρ มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามการคาดคะเนตามกฎของคูลอมบ์ ดังนั้นจึงใช้วิธีการกำจัดตัวแปรที่ไม่จำเป็นออกไป ด้วยเหตุผลที่ว่าสนามแปรค่าตามแนว ρ เท่านั้น เมื่อพิจารณาต่อไปว่าถ้าการเพิ่มความยาวของเส้นประจุทุกๆหน่วยความยาวเล็กๆเปรียบเสมือนเป็นการวางประจุแบบจุดแต่ละประจุที่วางต่อกันไปมีผลทำให้การกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ไปตามจำนวนประจุที่วางต่อกันนั้น(โดยสมมติว่าเป็นประจุเชิงเส้นแบบประจวบ)ไม่มีส่วนใดๆของประจุที่ทำให้ได้ส่วนประกอบสนามตามแนวแกน ϕ ดังนั้น E_ϕ จึงมีค่าเป็นศูนย์แต่อย่างไรก็ตามส่วนของเส้นประจุยังคงทำให้เกิดส่วนประกอบสนามทั้ง E_r และ E_z อยู่ดีแต่ด้วยชิ้นส่วนของเส้นประจุเล็กๆทั้งที่อยู่ด้านเหนือและด้านใต้ของจุดกำเนิดที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดเท่าๆกันทำให้เกิดความเข้มสนาม E_z ที่ตำแหน่งใดๆ รวมกันมีค่าหักล้างกันหมดไป เราจะพบว่า มีเพียงส่วนประกอบ E_r เท่านั้นที่เหลืออยู่และแปรค่าไปตาม ρ จากนั้นจึงหาค่าส่วนประกอบของสนามนี้เพียงอย่างเดียว เราเลือกจุด $P(0,y,0)$ บนแกน y ในการหาค่าสนามเพราะจุดนี้เป็นจุดที่ใช้เป็นตำแหน่งต่างๆไปได้อย่างสมบูรณ์แบบ การสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสนามตามแนว ϕ และ z เมื่อใช้สมการหาค่าการเพิ่มขึ้นของสนามที่จุด P เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของชิ้นส่วนของประจุ $dQ = \rho_l dz'$ จะได้

$$dE = \frac{\rho_l dz'(r-r')}{4\pi\epsilon_0 |r-r'|^{3/2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$r = ya_y = \rho a_\rho$$

$$r' = z'a_z$$

ดังนั้น

$$dE = \frac{\rho_L dz'(\rho a_\rho - z'a_z)}{4\pi\epsilon_0(\rho^2 + z'^2)^{3/2}}$$

เนื่องจากว่ามีเพียงส่วนประกอบของ E_ρ เท่านั้นที่เหลืออยู่เราจึงทำสมการให้ง่ายขึ้นได้เป็น

$$dE_\rho = \frac{\rho_L \rho dz'}{4\pi\epsilon_0(\rho^2 + z'^2)^{3/2}}$$

$$E_\rho = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho_L \rho dz'}{4\pi\epsilon_0(\rho^2 + z'^2)^{3/2}}$$

เมื่ออินทิเกรตโดยใช้ตารางหรือโดยการเปลี่ยนตัวแปร $z' = \rho \cot \theta$ หาค่าได้เป็น

$$E_\rho = \frac{\rho_L}{4\pi\epsilon_0} \rho \left[\frac{1}{\rho^2} \frac{z'}{\sqrt{\rho^2 + z'^2}} \right]_{-\infty}^{\infty}$$

$$E_\rho = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0 \rho}$$

เมื่อใช้การแปลงตัวแปรที่มีอยู่เป็นมุม θ เพื่ออินทิเกรตโดยให้ $z' = \rho \cot \theta$ ด้วยวิธีการแทนค่านี้จะได้ค่าต่างๆได้เป็น

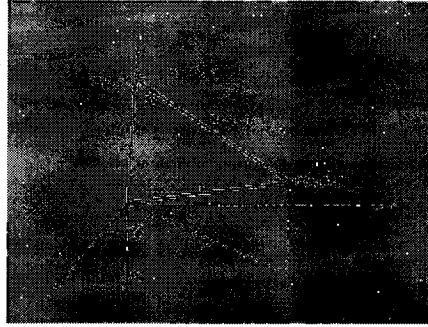
$dz' = -\rho \csc^2 \theta d\theta$ ดังนั้น $R = \rho \csc \theta$ เพื่อให้เป็นรูปแบบอินทิกรัลอย่างง่ายดังนี้

$$dE_\rho = \frac{\rho_L \rho dz'}{4\pi\epsilon_0 R^2} \sin \theta = \frac{-\rho_L \sin \theta d\theta}{4\pi\epsilon_0 \rho}$$

$$E_\rho = \frac{\rho_L}{4\pi\epsilon_0 \rho} \int_x^0 \sin \theta d\theta = \left. \frac{\rho_L}{4\pi\epsilon_0 \rho} \cos \theta \right]_x^0$$

$$= \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0 \rho}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 การอินทิเกรตโดยไม่คำนึงถึงปริมาตร

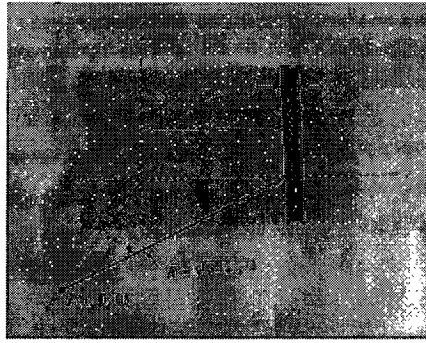
สำหรับเส้นประจุที่มีความยาวอนันต์

สนามที่แผ่ออกไปทั่วบริเวณห่างจากเส้นประจุ เมื่อเทียบกับประจุแบบจุดที่มีค่าลดลงกับระยะทางยกกำลังสอง จะพบว่าที่ระยะห่างที่เท่ากันสนามที่เกิดจากเส้นประจุจะมีค่ามากกว่าสนามเนื่องจากจุดของประจุ หลังจากวิเคราะห์สนามที่เกิดจากเส้นประจุจะพบว่าไม่มีเส้นประจุใดๆวางไว้ที่แกน z เพียงที่เดียวเสมอไป

2.2.5 สนามเนื่องจากประจุนิคมแผ่น(Field of Sheet of Charge)

ประจุแบบพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งคือแผ่นประจุนาคกว้างยาวอนันต์มีการกระจายความหนาแน่นประจุต่อหน่วยพื้นที่เป็น $\rho_s \text{ C/m}^2$ ตัวอย่างเช่นการประมาณค่าประจุที่อยู่ผิวของตัวนำ จะพบว่าประจุคงที่ปรากฏอยู่บนผิวตัวนำแต่ไม่ปรากฏอยู่ภายในเนื้อตัวนำ ดังนั้น ρ_s จึงรู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นความหนาแน่นประจุเชิงพื้นผิวทำให้รูปแบบความหนาแน่นประจุมิกันครบชุดซึ่งได้แก่ประจุแบบจุด แบบเชิงเส้น ประจุแบบเชิงผิว และแบบเชิงปริมาตรหรือ Q, ρ, ρ_s และ ρ_v ตามลำดับ ต่อไปเราจะใส่แผ่นประจุในระนาบ yz และทำการพิจารณาความสมมาตรอีกเช่นเดียวกันกับครั้งที่แล้วตามรูปจะเห็นว่าสนามไม่เปลี่ยนแปลงตาม y และ z จากนั้นจะพบว่าส่วนของประจุเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรกันนั้นจะทำให้สนามที่เป็นส่วนประกอบของแกน y กับ z จากนั้นจะพบว่าส่วนของประจุเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรกันนั้นจะทำให้สนามที่เป็นส่วนประกอบของแกน y และ z มีค่าหักล้างกันหมดไปจึงเหลือเฉพาะสนาม E_x เท่านั้นที่ต้องหาค่า และในส่วนประกอบของสนามนี้เป็นฟังก์ชันของ x เท่านั้น จากนั้นจึงทำการหาค่าส่วนประกอบที่ว่ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 ประจุแผ่นขนาดกว้างยาวอนันต์วางบนระนาบ yz จุด P ใดๆ อยู่บนแกน x และเส้นประจุมีความกว้างเชิงอนุพันธ์ใช้สำหรับเป็นชิ้นส่วนประจุเพื่อการคำนวณสนามที่จุด P

แผ่นประจุขนาดกว้างยาวอนันต์วางอยู่ในระนาบ yz จุด P ใดๆ อยู่บนแกน x และเส้นประจุมีความกว้างเชิงอนุพันธ์ใช้สำหรับเป็นชิ้นส่วนของประจุเพื่อคำนวณหาสนามที่จุด P โดยที่

$$dE = \rho_s dy' a_r / (2\pi\epsilon_0 R^2)$$

สนามที่คำนวณมาได้จากเส้นประจุโดยการแบ่งส่วนของแผ่นประจุเป็นเส้นประจุที่มีความกว้างเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในรูปความหนาแน่นประจุเชิงเส้นหรือความหนาแน่นประจุต่อหน่วยความยาวเป็น $\rho_L = \rho_s dy'$ และระยะห่างจากประจุเส้นถึงจุด P ใดๆ บนแกน x มีค่าเป็น $R = \sqrt{x^2 + y'^2}$ ปริมาณส่วนหนึ่งของ E_x ที่หาได้จากแผ่นประจุที่แบ่งเป็นเส้นอนุพันธ์เล็กๆ นี้จึงกลายเป็น

$$dE_x = \frac{\rho_s dy'}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{x^2 + y'^2}} \cos\theta = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_0} \frac{xdy'}{x^2 + y'^2}$$

เมื่อรวมผลที่ได้จากแผ่นเส้นประจุเชิงอนุพันธ์เล็กๆ ทั้งหมด ได้เป็น

$$dE_x = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{xdy'}{x^2 + y'^2} = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_0} \left[\tan^{-1} \frac{y'}{x} \right]_{-\infty}^{\infty} = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0}$$

ถ้าทำการเลือกจุด P ที่ตำแหน่งด้านบนบนแกน x มีค่าลบ จะได้

$$E_x = -\frac{\rho_s}{2\epsilon_0}$$

เพื่อลดความยุ่งยากในการใส่เครื่องหมายให้สนามและมักจะหาสนามจากประจุที่มีค่าเป็นบวกโดยกำหนดไปด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย a_n ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับระนาบของประจุและมีทิศพุ่งออกจากระนาบประจุ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_N$$

จะพบว่าสนามมีขนาดและทิศทางคงที่ ไม่ว่าจะพิจารณาในที่ห่างไกลจากแผ่นระนาบผิวของประจุออกไปไกลแค่ไหนก็ตาม ในกรณีของแผ่นประจุที่กว้างยาวอนันต์อีกแผ่นหนึ่งมีประจุเป็นลบและมีความหนาแน่นประจุผิวเป็น $-\rho_s$ วางอยู่ที่ระนาบ $x=a$ เราอาจจะหาค่าสนามรวมได้โดยรวมสนามที่ได้จากประจุแต่ละแผ่นที่ระนาบ $x > a$

$$E_+ = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_x \quad E_- = -\frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_x \quad E = E_+ + E_- = 0$$

ส่วนที่ $x < 0$

$$E_+ = -\frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_x \quad E_- = -\frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_x \quad E = E_+ + E_-$$

เมื่อ $0 < x < a$

$$E_+ = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_x \quad E_- = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_x$$

แล้ว

$$E = E_+ + E_- = \frac{\rho_s}{\epsilon_0} a_x$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสนามที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานสองตัวของตัวเก็บประจุแบบมีช่องว่างเป็นอากาศ มีความกว้างและยาวของแผ่นตัวนำมากกว่าระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองซึ่งมีช่องว่างเป็นอากาศจึงพิจารณาได้ว่าไม่มีสนามใดๆรั่วออกมาด้านข้างที่ขอบของแผ่นตัวนำทั้งสอง ซึ่งในความเป็นจริงสนามภายนอกของตัวเก็บประจุไม่เป็นศูนย์ แต่การวิเคราะห์ข้างต้นพิจารณาในทางอุดมคติเรามักคิดว่าสนามภายนอกมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้

2.2.6 สนามเส้นกระแสและการเขียนรูปแทนเส้นสนาม(Streamlines and Sketches of Fields)

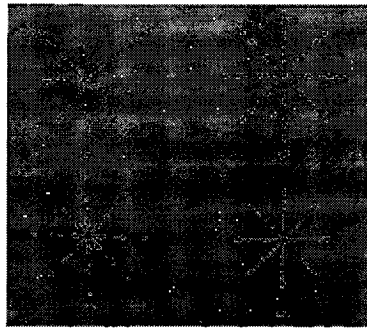
หลังจากที่ได้วิเคราะห์สมการผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ทางเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าสำหรับประจูปรูปแบบต่างๆแล้ว ในการหาขนาดและทิศทางของสนามจากสมการซึ่งสามารถทำได้ง่าย เราไม่สามารถนำเอาวิธีนี้ไปใช้ได้เสมอไปเนื่องจากการแก้ปัญหาโดยใช้รูปแบบประจูปอย่างง่ายไม่สามารถใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับรูปแบบการกระจายประจุแบบอื่น ได้เพราะเมื่อระบบของตัวเก็บประจุมีความซับซ้อนมากขึ้นจะทำให้มองเห็นภาพสนามได้ยาก เมื่อพิจารณาประจุเส้น

$$E = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho} a_\rho$$

จากรูปแสดงหน้าตัดด้านบนของเส้นประจุซึ่งพยายามเขียนรูปของสนามโดยใช้ส่วนของเส้นทึบเป็นตัวแทนของสนามที่มีความยาวแปรตามขนาดของสนาม และชี้ไปตามทิศทางของสนาม E และเมื่อวาดโดยเน้นให้มีความสมมาตรในเส้นแนวตำแหน่งต่างๆ และเขียนเส้นให้มีความยาวมากในตำแหน่งที่มีความหนาแน่นมาก ในการบรรยายถึงรูปแบบจะแสดงเพียงแค่ทิศทางของ E โดยจะเขียนเส้นตรงยาวต่อเนื่องจากประจุไปในทุกทิศทางที่ขนานกับสนาม E การกระจายของเส้นตรงเป็นไปอย่างสมมาตรและแสดงให้เห็นความสมมาตรในแกนตั้งและหัวลูกศรชี้แสดงทิศทาง บางครั้งเรียกเส้นที่ว่านี้ว่าสนามเส้นกระแส(Streamline)และเส้นฟลักซ์และทิศทางของเส้นยังคงใช้เหมือนกัน หากมีประจุบวกทดสอบเล็กๆ วางอยู่ที่จุดใดๆภายในสนามนี้จะทำให้มันเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งที่มีทิศทางไปตามสนามเส้นกระแสที่ลากผ่านจุดนั้นๆ จะพบว่าในเรื่องขนาดของสนามจะมีขนาดแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเส้นกระแส ซึ่งถ้าเส้นกระแสชิดกันมากแสดงว่ามีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงและในกรณีของสนามเส้นกระแสของประจุแบบจุดการวาดแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามที่ด้านเข้าหรือออกจากกระดาศจะมีความยุ่งยาก ดังนั้นการร่างภาพสนามของเส้นกระแสจึงมีเพียงสองมิติซึ่งจำเป็นที่จะต้องกำหนดตัวแปรที่ระนาบใดระนาบหนึ่งให้คงที่ เช่น $E_z = 0$ สนามเส้นกระแสก็จะถูกจำกัดไว้ที่ระนาบที่ z มีค่าคงที่แล้วทำการร่างภาพสนามเส้นกระแสที่แปรตามระนาบอื่นๆ เส้นร่างกระแสสนามอีกแบบหนึ่งตามรูปส่วนประกอบของ E_x และ E_y ซึ่งชี้ไปตามจุดต่างๆด้วยรูปร่างที่วาดมาได้นั้นหามาได้จาก

$$\frac{E_y}{E_x} = \frac{dy}{dx}$$



ภาพที่ 2.14 แบบร่างของเส้นกระแสสนามแบบต่างๆ

จากการที่ฟังก์ชันของ E_x และ E_y (และค่าคงที่อื่นๆหามาได้จากสมการอนุพันธ์) ทำให้สามารถนำไปหาสมการของสนามเส้นกระแสได้ เมื่อพิจารณาถึงสนามที่ได้จากประจุเส้นที่มีความหนาแน่นประจุ

$$\rho_L = 2\pi\epsilon_0$$

กรณีที่เขียนในพิภคฉาก

$$E = \frac{1}{\rho} a_\rho$$

$$E = \frac{x}{x^2 + y^2} a_x + \frac{y}{x^2 + y^2} a_y$$

ดังนั้นสมการเชิงอนุพันธ์คือ

$$\frac{dy}{dx} = \frac{E_x}{E_y} = \frac{y}{x} \quad \text{หรือ} \quad \frac{dy}{y} = \frac{dx}{x}$$

ดังนั้น

$$\ln y = \ln x + C_1$$

จากสมการเราจะหาสนามเส้นกระแสได้จาก $y = Cx$

หากต้องการหาสมการของสนามเส้นกระแสเฉพาะที่หนึ่ง โดยผ่านจุดใดๆ สามารถหาได้โดยการแทนพิภคของจุดนั้นลงในสมการแล้วคำนวณหาค่าคงที่ C สนามเส้นกระแสแต่ละเส้นจะสัมพันธ์กับค่า C เสมอ

ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า กฎของเกาส์และไดเวอร์เจนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

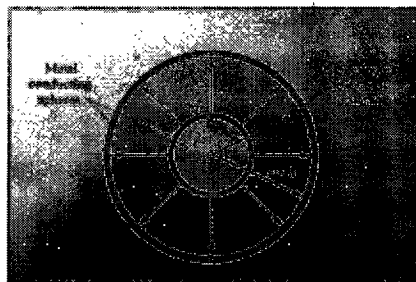
จากแนวความคิดของสนามเส้นกระแสหรือเส้นแรงซึ่งแสดงซึ่งแสดงทิศทางของแรงที่จุดต่างๆบนประจุทดสอบเส้นแรงเหล่านี้มักเรียกว่าเส้นฟลักซ์หรือฟลักซ์(Flux) การสร้างเส้นฟลักซ์ที่ไหลออกมาจากประจุคู่อย่างสมมาตรสามารถทำได้เช่นเดียวกันกับสนามเส้นกระแสและแสดงให้เห็นว่าฟลักซ์นี้จะปรากฏในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าอยู่

2.2.7 ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า(Electric Flux Density)

การทดลองของฟาราเดย์ที่ใช้เครื่องมือซึ่งประกอบด้วยครึ่งทรงกลม 2 อันที่ยึดติดหรือถอดออกจากกันได้ช่องระหว่างทรงกลมทั้งสองนั้นมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริกแทรกอยู่ ฟาราเดย์พบว่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่เปลือกผิวของทรงกลมชั้นนอกนั้นมีขนาดเท่ากับประจุไฟฟ้าเริ่มต้นที่ใส่เข้าไปในทรงกลมชั้นในโดยไม่ต้องคำนึงถึงฉนวนที่ใส่กันไว้ระหว่างทรงกลมทั้งสองซึ่งสามารถสรุปได้ว่ามีฟลักซ์จากทรงกลมชั้นในพุ่งออกไปยังทรงกลมชั้นนอกการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าประจุบวกขนาดใหญ่ค่าหนึ่งที่อยู่ภายในทรงกลมชั้นนอกจะเหนี่ยวนำประจุลบค่าเท่ากันนั้นลงบนผิวทรงกลมชั้นนอกทำให้เกิดการแปรผันโดยตรงระหว่างฟลักซ์ไฟฟ้าและประจุไฟฟ้าบนทรงกลมชั้นในถ้าฟลักซ์ไฟฟ้านั้นใช้สัญลักษณ์ ψ (psi) และประจุไฟฟ้าทั้งหมดบนทรงกลมชั้นในใช้สัญลักษณ์ Q ดังนั้นจากการทดลองจึงพบว่า

$$\psi = Q$$

ฟลักซ์ไฟฟ้า ψ วัดในหน่วยคูลอมบ์(Culomb)เส้นทางต่างๆของฟลักซ์ไฟฟ้าที่สร้างจากประจุไฟฟ้า Q คูลอมบ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวที่มีพื้นที่ $4\pi a^2$ ดังนั้นความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผิวนี้จึงมีค่า $\psi/4\pi a^2$ หรือ $Q/4\pi a^2$ C/m² ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า(Electric flux density)แทนด้วย D เป็นสนามเวกเตอร์



ภาพที่ 2.15 ฟลักซ์ไฟฟ้าบริเวณระหว่างทรงกลม 2 ชั้นที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันซึ่งมีประจุไฟฟ้า ทิศทางและขนาดของ D ไม่เป็นฟังก์ชันของไดอิเล็กตริกที่แทรกอยู่ระหว่างทรงกลมทั้งสองไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้ามีทิศทางตามแนวรัศมีโดยมีค่าเท่ากับ

$$D]_{r=a} = \frac{Q}{4\pi a^2} a_r \quad \text{ทรงกลมชั้นใน}$$

$$D]_{r=b} = \frac{Q}{4\pi b^2} a_r \quad \text{ทรงกลมชั้นนอก}$$

และที่ระยะ r ระหว่างผิวทรงกลมทั้งสองหรือ $a \leq r \leq b$

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2} a_r$$

ถ้าลองให้ทรงกลมชั้นในมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆจนกลายเป็นจุดแต่ยังคงมีประจุ Q เท่าเดิมความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าที่ระยะทาง r เมตรจากจุดนั้นจะมีค่าเท่ากับ

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2} a_r$$

ฟลักซ์จำนวน Q คือเส้นที่พุ่งออกมาจากประจุไฟฟ้าอย่างสมมาตรผ่านผิวทรงกลมที่จินตนาการขึ้นมา โดยมีพื้นที่ $4\pi a^2$ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากประจุดไฟฟ้าในที่ว่างอิสระในสมการก่อนหน้า

$$E = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 r^2} a_r$$

จะได้ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าในที่ว่างอิสระเป็น

$$D = \epsilon_0 E$$

แม้สมการข้างบนจะใช้กับอวกาศแต่ก็ไม่ได้จำกัดเฉพาะสำหรับประจุดไฟฟ้าเท่านั้นในกรณีสำหรับการกระจายประจุเชิงปริมาตรทั่วไปในที่ว่างอิสระจะได้สมการเป็น

$$E = \int \frac{\rho dv}{4\pi \epsilon_0 R^2} a_R$$

ความสัมพันธ์ได้พัฒนามาจากประจุไฟฟ้าเดี่ยวทำให้สมการข้างต้น หากค่า D ได้เป็น

$$D = \int \frac{\rho dv}{4\pi R^2} a_R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการข้างต้นจึงเป็นจริงสำหรับรูปแบบต่างๆของประจุไฟฟ้าในที่ว่างอิสระเรานิยามสมการข้างบนว่าเป็นนิยามของ D ในที่ว่างอิสระ เนื่องจาก D เป็นตัวแปรที่แปรผันตรงกับ E ในที่ว่างอิสระแต่เพราะเนื่องจาก D เกิดขึ้นมาจากแนวความคิดของฟลักซ์ซึ่งเป็นแนวความคิดใหม่ที่สำคัญและเพราะ D ที่ได้มามีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสนาม E เนื่องจากค่าของ ϵ_0 น้อยมากและอีกประการหนึ่งก็จะเป็นการดีกว่าถ้าได้ทราบถึงค่า D ก่อนที่จะนำมาใช้กับสารไดอิเล็กตริก

2.2.8 กฎของเกาส์ (Gauss's Law)

การทดลองของฟาราเดย์สรุปได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ผ่านผิวทรงกลมในจินตนาการที่สร้างอยู่ระหว่างทรงกลมร่วมทั้งสองจะเท่ากับประจุที่บรรจุอยู่ในผิวทรงกลมที่จินตนาการนั้นประจุที่บรรจุอยู่ภายในนี้จะกระจายออกมาที่ผิวทรงกลมชั้นในหรืออาจจะรวมกันเป็นประจุจุดไฟฟ้าที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่จินตนาการขึ้นมานี้ก็ได้อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟลักซ์ไฟฟ้า 1 คูลอมป์สร้างมาจากประจุไฟฟ้า 1 คูลอมป์ ดังนั้นที่ตัวนำไฟฟ้าชั้นในอาจจะเป็นรูปลูกบาศก์หรือแท่งก็ได้และประจุทั้งหมดที่ถูกเหนี่ยวนำออกมาที่ผิวทรงกลมชั้นนอกนั้นยังคงมีค่าเท่าเดิมแน่นอนว่าความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้านั้นจะเปลี่ยนจากการกระจายที่สมมาตรไปยังรูปทรงที่ไม่ทราบค่ามันแต่ประจุ $+Q$ บนแท่งประจุไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้า $-Q$ คูลอมป์บนทรงกลมที่ล้อมรอบ ประจุไฟฟ้า $+Q$ บนแท่งประจุไฟฟ้าจะสร้าง $\psi = 0$ เส้นฟลักซ์ที่เหนี่ยวนำ $-Q$ คูลอมป์บนผิวด้านนอกนั้นจากการวิเคราะห์ตามกฎของฟาราเดย์นำมาซึ่งกฎของเกาส์ซึ่งนิยามว่าฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผิวปิดใดๆจะมีค่าเท่ากับประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่อยู่ภายในพื้นที่ผิวปิดนั้นๆหากจินตนาการว่าการกระจายของประจุไฟฟ้าที่อยู่เป็นกลุ่มของประจุจุดไฟฟาล้อมรอบด้วยผิวปิดในรูปแบบใดๆผิวปิดนั้นอาจจะเป็ผิวปิดของเนื้อสารจริงๆ แต่ความจริงแล้วจะเป็นพื้นผิวปิดใดๆถ้ามีประจุไฟฟ้าอยู่ภายในทั้งหมด Q จะมีเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า Q คูลอมป์ผ่านผิวที่ปิดล้อมเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า D ที่จุดทุกจุดบนผิวนั้นมีขนาด D , โดยตัวอักษร S แสดงให้เห็นว่า D จะต้องพิจารณาบนผิวโดยทั่วไปแล้ว D , จะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดของทิศทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งบนพื้นผิวปิดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า D_s ที่จุด P อันเนื่องมาจากประจุ Q

เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่เพิ่มเข้ามาของผิว ΔS ซึ่งใกล้จะเป็นส่วนประกอบของระนาบและการอธิบายองค์ประกอบผิวนี้ต้องทราบถึงขนาด ΔS และการจัดวางในอวกาศหรืออีกนัยหนึ่งคือ องค์ประกอบผิวที่เพิ่มเข้ามานี้เป็นปริมาณเวกเตอร์โดย ΔS จะมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบที่สัมผัสทั้งหมด และมีทิศตั้งฉากและพุ่งออกมาจากผิวปิด การพุ่งออกจากผิวปิดและการพุ่งออกจึงเป็นนิยามที่ถูกกำหนดไว้ การพิจารณาองค์ประกอบพื้นผิว ΔS ที่จุด P ใดๆ โดยให้ D_s ทำมุม θ กับ ΔS

$$\Delta \psi = \text{ฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผ่าน } \Delta S = D_{s_normal} \Delta S = D_s \cos \theta \Delta S = D_s \cdot \Delta S$$

จากนิยามของผลคูณแบบจุดจะพบว่า ฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านผิวปิดนั้นจะได้อาจมาจกผลรวมของเส้นฟลักซ์ที่องค์ประกอบผิว ΔS

$$\psi = \int d\psi = \oint_{\text{closed surface}} D_s \cdot dS$$

ผลรวมที่ได้จากการอินทิเกรตคือการอินทิเกรตผิวปิด (Closed surface integration) เนื่องจากว่า องค์ประกอบผิว ΔS เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์ 2 พิกัดเสมอเช่น $dx dy$ $\rho d\phi d\rho$ หรือ $r^2 \sin\theta d\theta d\phi$ โดยมีผลการอินทิเกรตเป็นอินทิเกรตสองชั้นตัว

อักษรย่อ S เป็นตัวบอกว่าเป็นอินทิเกรตเชิงพื้นผิวและเรียกพื้นผิวปิดนั้นว่าพื้นผิวเกาส์เซียน (Gaussian Surface) ดังนั้นสมการคณิตศาสตร์บนผิวปิดตามกฎของเกาส์คือ

$$\psi = \oint D_s \cdot dS = \text{ประจุที่อยู่ภายในผิวปิด} = Q$$

โดยที่ประจุที่อยู่ในนั้นอาจจะเป็นประจุจุดไฟฟ้าหลายตัว หรือเส้นประจุไฟฟ้า แผ่นประจุไฟฟ้า หรือก้อนประจุไฟฟ้าก็ได้ ซึ่งรูปแบบสมการที่นิยมใช้จะเป็น

$$Q = \int \rho_v dv$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรืออาจจะนำกฎของเกาส์มาเขียนในรูปแบบการกระจายประจุแบบทั่วไปได้คือ

$$\oint_s D_s \cdot dS = \int_{vol} \rho_v \cdot dv$$

ความหมายทางคณิตศาสตร์คือฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผ่านผิวปิดใดๆจะเท่ากับประจุที่อยู่ภายในผิวปิดนั้นการใช้กฎของเกาส์ในการทดลองของฟาราเดย์คือการวางประจุจุดไฟฟ้า Q ที่จุดกำเนิดในพิภคทรงกลมแล้วเลือกผิวปิดเป็นทรงกลมที่มีรัศมี a สนามไฟฟ้าของประจุจุดที่ได้พิจารณาแล้วจะมีค่า

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} a_r$$



ภาพที่ 2.17 การประยุกต์กฎของเกาส์ในการหาสนามไฟฟ้าที่พุ่งออกมาจากประจุ Q บนผิวปิดทรงกลม

ดังนั้น

$$D = \epsilon_0 E$$

ก่อนหน้านี้เราจะได้ว่า

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2} a_r$$

ดังนั้นที่ผิวทรงกลมจึงมีค่า

$$D_r = \frac{Q}{4\pi a^2} a_r$$

จะได้องค์ประกอบเชิงอนุพันธ์ของพื้นที่ผิวทรงกลมมีค่าเป็น

$$dS = r^2 \sin\theta d\theta d\phi = a^2 \sin\theta d\theta d\phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$dS = a^2 \sin \theta d\theta d\phi,$$

ดังนั้น

$$D_r \cdot dS = \frac{Q}{4\pi a^2} a^2 \sin \theta d\theta d\phi, \quad \therefore \int \frac{Q}{4\pi} \sin \theta d\theta d\phi$$

จึงทำให้การอินทิเกรตบนผิวปิดเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \frac{Q}{4\pi} \sin \theta d\theta d\phi$$

เมื่อเลือกขอบเขตของการอินทิเกรตเพื่อให้ครอบคลุมผิวปิดทั้งหมดของทรงกลมจะได้รับการอินทิเกรตเท่ากับ

$$\int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \frac{Q}{4\pi} (-\cos \theta)_0^{\pi} d\phi \int_0^{2\pi} \frac{Q}{2\pi} d\phi = Q$$

จากผลที่ได้แสดงว่าฟลักซ์ไฟฟ้า Q คูณลบที่ผ่านผิวปิดนั้นมีค่าเท่ากับประจุที่อยู่ภายในผิวปิดนั้น

2.2.9 ไคเวอร์เจนซ์(Divergence)

ไคเวอร์เจนซ์เป็นโอเปอเรเตอร์ที่ใช้ในการสืบหาค่าทางฟิสิกส์ มีนิยามว่า

ไคเวอร์เจนซ์ของ

$$A = \text{div} A = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\oint A \cdot dS}{\Delta v}$$

และมักจะเขียนย่อด้วย $\text{div} A$ ไคเวอร์เจนซ์ของเวกเตอร์ใดๆจะมีความหมายทางฟิสิกส์คือเป็นโอเปอเรเตอร์ที่แสดงด้วยเทอมทางขวามีของสมการข้างบนเมื่อพิจารณา A เป็นสมาชิกในตระกูลของความหนาแน่นฟลักซ์ของเวกเตอร์เพื่อช่วยในการแปลความหมายทางฟิสิกส์ ไคเวอร์เจนซ์ของความหนาแน่นฟลักซ์ของเวกเตอร์ A จะเป็นฟลักซ์ที่ไหลออกมาจากพื้นที่ผิวย่อยปิดต่อหน่วยปริมาตรเมื่อปริมาตรลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ไคเวอร์เจนซ์ที่เป็นบวกสำหรับปริมาณเวกเตอร์นั้นบ่งบอกถึงการเป็นแหล่งจ่าย(Source)ของปริมาณเวกเตอร์ที่จุดนั้น ในทำนองเดียวกันไคเวอร์เจนซ์ที่เป็นค่าลบแสดงว่ามีกรดึง(Sink)ของเวกเตอร์นั้น เมื่อเขียนสมการใหม่จะได้

$$\text{div} D = \left(\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ที่ได้มีได้อยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าเลยแต่เป็นรูปแบบที่ได้จากนิยามทางฟิสิกส์ของไดเวอร์เจนซ์กับองค์ประกอบเชิงอนุพันธ์ของปริมาตรในพิกัดฉาก ถ้าใช้ส่วนประกอบของปริมาตรในเชิงอนุพันธ์ของระบบพิกัดแบบต่างๆจะได้สมการเป็น

$$\operatorname{div} D = \left(\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \right) \quad (\text{พิกัดฉาก})$$

$$\operatorname{div} D = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho D_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial D_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \quad (\text{พิกัดทรงกระบอก})$$

$$\operatorname{div} D = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 D_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta D_\theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial D_\phi}{\partial \phi} \quad (\text{พิกัดทรงกลม})$$

ไดเวอร์เจนซ์นั้นเป็นโอเปอเรเตอร์สำหรับเวกเตอร์แต่มีผลลัพธ์เป็นปริมาณสเกลาร์ในลักษณะที่คล้ายกับผลคูณจุดหรือผลคูณสเกลาร์ที่เป็นการคูณของเวกเตอร์สองตัวแล้วให้ปริมาณสเกลาร์ออกมา ความจริงแล้วไดเวอร์เจนซ์บอกให้เราทราบว่า มีฟลักซ์ไฟฟ้าจำนวนเท่าไรที่ออกมาจากปริมาตรย่อยบนพื้นฐานต่อหน่วยปริมาตรโดยไม่ได้รวมถึงทิศทางการไหลของ ฟลักซ์นั้นๆ

2.2.10 โอเปอเรเตอร์ ทางเวกเตอร์ ∇ และทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์

(The vector operator ∇ and The divergence theorem)

เนื่องจากไดเวอร์เจนซ์เป็นโอเปอเรเตอร์ทางเวกเตอร์ที่ให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นปริมาณสเกลาร์ เช่นเดียวกับผลคูณจุดของเวกเตอร์ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะหาอะไรบางอย่างมาคูณกับ D แล้วให้ค่าผลลัพธ์ออกมาเป็น

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$$

จะพบว่าค่าดังกล่าวไม่สามารถหาได้จากผลคูณจุดแต่จะต้องเป็นโอเปอเรเตอร์อย่างหนึ่งมาคูณด้วยเหตุนี้เราจึงกำหนดให้ ∇ เป็นโอเปอเรเตอร์ทางเวกเตอร์นั้น

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} a_x + \frac{\partial}{\partial y} a_y + \frac{\partial}{\partial z} a_z$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอเปอเรเตอร์ทางสเกลาร์ที่คล้ายกันนี้มีอยู่ 2-3 วิธีสำหรับใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์เช่นเรามักจะใช้ D แทน $\frac{d}{dx}$, D^2 แทน $\frac{d^2}{dx^2}$ และ D^n แทน $\frac{d^n}{dx^n}$ เป็นต้น เรากำหนดว่า ∇ สามารถใช้แทนโอเปอเรเตอร์ต่างๆได้ โดยมีข้อยกเว้นที่สำคัญข้อหนึ่งคือจะให้ค่าเป็นอนุพันธ์ย่อยแทนที่จะเป็นผลคูณสเกลาร์ เมื่อพิจารณา $\nabla \cdot D$ จะกำหนดด้วย

$$\nabla \cdot D = \left(\frac{\partial}{\partial x} a_x + \frac{\partial}{\partial y} a_y + \frac{\partial}{\partial z} a_z \right) \cdot (D_x a_x + D_y a_y + D_z a_z)$$

เมื่อตัดทอนของเวกเตอร์หน่วยที่เป็นศูนย์ออกไปจะได้สมการเป็น

$$\nabla \square D = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$$

ซึ่งเรียกว่าเป็นไดเวอร์เจนซ์ของ D จะได้ว่า

$$\text{div } D = \nabla \square D = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$$

ประโยชน์ของ $\nabla \square D$ จะได้ว่ารูปสมการของอนุพันธ์ย่อยที่ถูกต้องและเขียนได้เร็วกว่าในเฉพาะพิกัดฉากเท่านั้น ในอีกแง่หนึ่ง $\text{div } D$ ทำให้ทราบถึงการแปลความหมายของไดเวอร์เจนซ์ นอกจากนี้โอเปอเรเตอร์ของเวกเตอร์ ∇ ไม่ได้ใช้เพียงแต่ไดเวอร์เจนซ์เท่านั้นแต่ยังใช้กับโอเปอเรเตอร์อื่นด้วยเช่น ∇u เมื่อ u คือปริมาณสเกลาร์ใดๆที่ทำให้

$$\nabla u = \left(\frac{\partial}{\partial x} a_x + \frac{\partial}{\partial y} a_y + \frac{\partial}{\partial z} a_z \right) u = \frac{\partial u}{\partial x} a_x + \frac{\partial u}{\partial y} a_y + \frac{\partial u}{\partial z} a_z$$

โอเปอเรเตอร์ ∇ ไม่มีรูปแบบเฉพาะในระบบพิกัดอื่นถ้าเราพิจารณา ∇ ในพิกัดทรงกระบอกดังนั้น $\nabla \square D$ ซึ่งใช้แทนไดเวอร์เจนซ์ของ D ในพิกัดทรงกระบอกคือ

$$\nabla \square D = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho D_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial D_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$$

จะพบว่าเราไม่มีรูปแบบเฉพาะสำหรับ ∇ เพียงแบบเดียวที่จะให้ผลรวมของค่าอนุพันธ์ย่อยซึ่งหมายความว่ายังไม่สามารถเขียน ∇u เป็นสมการใดๆได้ ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์เป็นทฤษฎีที่สะดวกในการพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาโดยเริ่มจากกฎของเกาส์

$$\oint D \cdot ds = Q$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก
$$Q = \int_V \rho_v dv$$

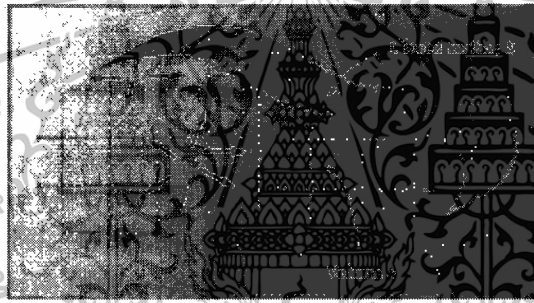
แทน
$$\rho_v \text{ ด้วย } \nabla \cdot D = \rho_v$$

จะได้
$$\oint_S D \cdot ds = Q = \int_V \rho_v dv = \int_V \nabla \cdot D dv$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างทอมแรกกับทอมสุดท้ายคือ ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์

$$\oint_S D \cdot ds = \int_V \nabla \cdot D dv$$

ซึ่งมีนิยามว่า ผลการอินทิเกรตของส่วนประกอบตั้งฉากของสนามเวกเตอร์ใดๆ บนผิวปิดนั้นจะเท่ากับผลการอินทิเกรตของไดเวอร์เจนซ์ของสนามเวกเตอร์ที่พุ่งออกมาจากปริมาตรที่ปิดล้อม โดยผิวปิดนั้น



ภาพที่ 2.18 แสดงทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์สำหรับฟลักซ์ทั้งหมดที่พุ่งผ่านผิวปิด

ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์เป็นจริงสำหรับสนามเวกเตอร์ใดๆ ถึงแม้ว่าเราจะหามาได้จากความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า D และสามารถนำไปประยุกต์กับสนามอื่นได้ ประโยชน์ของการแปลงระหว่างอินทิเกรต 3 ชั้นในปริมาตรก่อนหนึ่งมาเป็นอินทิเกรต 2 ชั้นของผิวที่ปิดล้อมปริมาตรนั้น ซึ่งทำให้การแก้ปัญหาทำได้ง่ายขึ้นมาก ประโยชน์ของทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ทำให้เห็นภาพทางกายภาพได้มากขึ้น หากเราพิจารณาปริมาตร v ซึ่ง(แสดงตามรูป)ล้อมรอบด้วยผิวปิด s การแบ่งปริมาตรออกมาเป็นส่วนประกอบเล็กๆขนาดต่างๆกันจำนวนมากและพิจารณาแค่ 1 เซลล์ แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์จากเซลล์นั้นไหลเข้าหรือพุ่งออกจากเซลล์ไปยังเซลล์ข้างเคียงถ้าเซลล์นั้นไม่มีส่วนของผิวภายนอก สรุปได้ว่าไดเวอร์เจนซ์ของความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ผ่านปริมาตรนั้นจะให้ผลเช่นเดียวกันกับการพิจารณาฟลักซ์สุทธิที่ตัดผ่านผิวปิดนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.11 พลังงานและศักย์ไฟฟ้า

การศึกษากฎของคูลอมบ์เพื่อจะนำมาใช้ในการหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณใดๆ สำหรับสนามเนื่องจากประจุอย่างง่ายชนิดต่างๆและใช้กฎของเกาส์ในการประยุกต์ใช้คำนวณหาสนามที่ได้จากประจุที่มีการกระจายเป็นรูปทรงสมมาตรการใช้กฎของเกาส์เป็นวิธีการที่ง่ายสำหรับกรณีประจุแบบสมมาตร โดยเฉพาะ เนื่องจากการอินทิเกรตจะกระทำเพียงพื้นที่ส่วนย่อยของพื้นที่ผิวปิดที่ได้เลือกไว้เท่านั้น กฎของคูลอมบ์มีความสามารถสูงที่จะนำไปใช้แก้ปัญหาต่างๆซึ่งกฎของเกาส์ไม่สามารถแก้ปัญหาได้การใช้กฎของคูลอมบ์นั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการใช้งานมากกว่าด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำสนามเวกเตอร์จะต้องหาได้โดยตรงจากการกระจายประจุ ถ้าเราสามารถหาฟังก์ชันสเกลาร์ซึ่งหาได้จากการอินทิเกรตเพียงชั้นเดียวแล้วนำมาคำนวณหาสนามไฟฟ้า ฟังก์ชันสเกลาร์นี้เป็นที่รู้จักกันในนามของศักย์ไฟฟ้า(Potential)ซึ่งจะพบว่าศักย์ไฟฟ้าสามารถนำไปบรรยายทางกายภาพได้ดีกว่าการให้นิยามของตัวแปรในกลุ่มของสนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าเป็นเครื่องมือสำหรับนำไปหาสนามไฟฟ้าด้วยการอินทิเกรตสเกลาร์

2.2.12 พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุจุดภายใต้สนามไฟฟ้า

(Energy Expended in Moving a Point Charge in an Electric Field)

ความเข้มสนามไฟฟ้ามีนิยามเป็นแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบ 1 หน่วยที่ตำแหน่ง ซึ่งต้องการทราบค่าเวกเตอร์ของสนามนี้ ถ้าเราทำการเคลื่อนประจุทดสอบด้านหรือสวนทางกับทิศทางของสนามไฟฟ้าเราจะต้องใช้แรงที่มีทิศตรงกันข้ามกับแรงที่ได้จากสนามนั้น จึงทำให้เกิดพลังงานหรือเกิดงานขึ้นจากการกระทำนี้ต้องการให้ประจุเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าพลังงานที่ได้จะกลายเป็นค่าติดลบคือเราไม่ได้งานหรือเราไม่ได้งานแต่สนามเป็นตัวกระทำแทน เช่นหากต้องการเคลื่อนประจุ Q ให้ได้ระยะทาง dL ภายใต้สนามไฟฟ้า E แรงที่กระทำต่อประจุ Q จากสนาม E มีค่าเป็น

$$F_E = QE$$

โดย F_E เป็นแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้า ส่วนประกอบของแรงในทิศทางเดียวกัน dL ซึ่งจะต้องหาค่าออกมาเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{EL} = F \cos \alpha_L = QE \cos \alpha_L$$

เมื่อ α_L เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง dL แรงที่เราจะต้องใส่เข้าไปเพื่อเคลื่อนประจุนี้จะต้องมีค่าเท่ากับแรงจากสนามแต่มีทิศตรงกันข้ามเป็น

$$F_{\text{appl}} = -QE \cos \alpha_L$$

และพลังงานที่ใช้ไปสำหรับการกระทำนี้เท่ากับผลคูณของแรงกับระยะทาง นั่นคือ งานเชิงอนุพันธ์ที่ได้จากแหล่งพลังงานภายนอกสำหรับการเคลื่อนประจุ $Q = -QE \cos \alpha_L dL = -QE \cos \alpha_L dL$

$$\text{หรือ } dW = -QE \cos \alpha_L dL$$

เมื่อเราแทน $\alpha_L dL$ ด้วยตัวแปรอย่างง่ายเป็น dL ปริมาณพลังงานเชิงอนุพันธ์อาจจะมีค่าเป็นศูนย์หากค่า $Q E$ หรือ dL เป็นศูนย์หรือในอีกกรณีหนึ่งคือ E กับ dL มีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกันหรือประจุจะเคลื่อนไปในทิศที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาประจุภายใต้สนามไฟฟ้าพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนประจุในระยะทางจำกัดค่าหนึ่งสามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรต พลังงานที่ได้โดยการเคลื่อนประจุภายในสนามไฟฟ้า

$$W = -Q \int_{\text{initial}}^{\text{final}} E \cos \alpha_L dL$$

โดยที่เส้นทางการอินทิเกรตจะต้องถูกกำหนดขึ้นก่อนการอินทิเกรตเพื่อหาค่างาน โดยสมมติว่าประจุนั้นอยู่ในสถานะหยุดนิ่งตั้งแต่ตำแหน่งเริ่มต้นไปจนถึงตำแหน่งสุดท้ายของการอินทิเกรต

2.2.13 ความต่างศักย์และศักย์ไฟฟ้า(Definition of potential Difference and Potential)

เรานิยามวิธีการหาความสัมพันธ์ของงาน โดยแหล่งพลังงานจากภายนอกที่ใช้ในการเคลื่อนประจุ Q จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งภายใต้สนาม E ค่าใดๆ ส่วนนิยามของความต่างศักย์และงานนั้นจะใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับการนิยามความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบ 1 หน่วยและความต่างศักย์ไฟฟ้า V คืองาน(จากแหล่งพลังงานภายนอก)ที่ใช้ในการเคลื่อนประจุทดสอบบวกหนึ่งหน่วยจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งภายใต้สนามไฟฟ้างั้น

$$\text{ความต่างศักย์} = V = - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} E \cos \alpha_L dL$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต่างศักย์ V_{AB} หมายถึงความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับจุด B ซึ่งเป็นงานในการเคลื่อนย้ายประจุหนึ่งหน่วยจากจุด B ที่เป็นจุดตั้งต้นไปยังจุด A ที่เป็นจุดปลายซึ่งเปรียบเสมือนว่าจุดตั้งต้น B เป็นจุดที่มักจะถูกกำหนดให้อยู่ไกลถึงระยะอนันต์ในขณะที่จุด A เป็นตำแหน่งที่แน่นอนของประจุหนึ่งที่เราจะทำการพิจารณา เราวัดความต่างศักย์ในหน่วยจูลต่อคูลอมบ์ซึ่งเป็นการนิยามโวลต์ที่เป็นหน่วยร่วมกับแรงดันไฟฟ้าคือ V ดังนั้นความต่างศักย์ระหว่างจุด A ถึงจุด B จึงมีค่าเป็น

$$V_{AB} = -\int_B^A E \, dL$$

และงานนั้นจะมีค่าเป็นบวกเมื่อการเคลื่อนประจুবวกจาก B ไป A ซึ่งหากพิจารณาเส้นประจูเราจะพบว่างานที่กระทำในการเคลื่อนประจุจาก $\rho = b$ จนถึง $\rho = a$ มีค่าเป็น

$$W = \frac{Q\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{a}$$

ดังนั้นความต่างศักย์ระหว่างจุดที่ $\rho = a$ ถึง $\rho = b$ จึงมีค่าเป็น

$$V_{ab} = \frac{W}{Q} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{a}$$

เราสามารถใช้นิยามนี้หาค่าความต่างศักย์โดยวิธีการอื่นระหว่างจุด A และจุด B ที่ระยะรัศมี r_A และ r_B จากประจุ Q ตามลำดับโดยเลือกวงประจุ Q ไว้ที่จุดกำเนิด

$$E = E_r a_r = \frac{\rho_L}{4\pi\epsilon_0 r^2} a_r$$

และ $dL = dr$,

เราจะได้

$$V_{AB} = -\int_B^A E \, dL = -\int_{r_B}^{r_A} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

ถ้า $r_A > r_B$ ความต่างศักย์ V_{AB} มีค่าเป็นบวกแสดงว่างานที่ได้นั้นต้องใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานภายนอกมานำประจুবวกเคลื่อนจากระยะ r_B ไปยัง r_A โดยปรกติแล้วจะกล่าวถึงศักย์ไฟฟ้าหรือศักย์ค่าสัมบูรณ์ที่จุดใดๆ มากกว่าความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด แต่จะต้องวัดเทียบกับจุดอ้างอิงที่พิจารณาว่า ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจุดอ้างอิงค่าศูนย์ในทางปฏิบัติหรือการวัดทางฟิสิกส์นั้นคือกราวด์ (Ground) ซึ่งหมายถึงศักย์ที่บริเวณผิวเปลือกโลกนั่นเองในทางทฤษฎีมักจะยึดว่าผิวนี้เป็นระนาบอนันต์ที่มี ศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ จุดอ้างอิงอีกแบบหนึ่งที่นิยมอ้างถึงก็คือ จุดอ้างอิงที่ระยะอนันต์การนำไปใช้มัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏอยู่ในทฤษฎีการประมาณสถานการณ์ทางฟิสิกส์ที่อยู่ห่างไกลจากผิวโลกมาก ในบางโอกาสได้มีการนำเอารัศมีของผิวทรงกระบอกมาเป็นจุดอ้างอิงศูนย์ถ้าเป็นทรงกระบอกแบบสมมาตรเนื่องจากการแสดงค่าที่จุดระยะอนันต์ไม่สะดวก เป็นต้น และเรามักจะนิยามความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับจุด B เมื่อทั้งสองจุดมีศักย์อ้างอิงศูนย์ที่ตำแหน่งเดียวกัน

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

2.2.14 สนามศักย์ไฟฟ้าของระบบประจุ(The Potential Field of a System of Charges)

ศักย์ไฟฟ้าที่จุดๆหนึ่งกำหนดโดยงานที่ได้รับเมื่อทำการเคลื่อนประจุทดสอบหนึ่งหน่วยจากจุดอ้างอิงมายังบริเวณที่พิจารณาเราได้นำเอาแรงนั้นมานิยามเป็นศักย์ไฟฟ้าซึ่งไม่ขึ้นกับเส้นทางใดในการเคลื่อนย้ายประจุและสนามแปรเป็นเชิงเส้นกับประจุทำให้สามารถใช้หลักการซ้อนทับ(Superposition)มาประยุกต์ใช้ซึ่งในขั้นต่อไปจะพิจารณาว่าศักย์เนื่องจากระบบประจุที่มีค่าที่จุดใดๆไม่ขึ้นกับเส้นทางในการเคลื่อนที่ประจุทดสอบไปยังจุดนั้นๆ ซึ่งในกรณีของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุดเดี่ยวซึ่งหาค่ามาจากประจุ Q_1 ที่วางอยู่ที่ตำแหน่ง r_1 เมื่อหาระยะห่างจาก Q_1 ไปยังจุด r ได้เป็น $|r-r_1|$ เมื่อคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าโดยให้ค่าศักย์อ้างอิงศูนย์ที่จุดระยะอนันต์ได้ค่าเป็น

$$V(r) = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 |r-r_1|}$$

ศักย์ไฟฟ้ารวมที่เกิดจากประจุด 2 ค่า Q_1 ที่ r_1 และ Q_2 ที่ r_2 เป็นฟังก์ชันเพียง $|r-r_1|$ กับ $|r-r_2|$ เท่านั้น ซึ่งเป็นระยะของจุดที่พิจารณาห่างจาก Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ

$$V(r) = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 |r-r_1|} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 |r-r_2|}$$

จะพบว่าเมื่อเพิ่มประจุเข้าไปเรื่อยๆ ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มตามจำนวน n ของประจุดคือ

$$V(r) = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 |r-r_1|} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 |r-r_2|} + \dots + \frac{Q_n}{4\pi\epsilon_0 |r-r_n|}$$

ถ้าประจุแต่ละจุดอ้างอิงถึงประจุในปริมาตรหนึ่งที่มีขนาดเล็กๆ โดยมีการกระจายความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอในปริมาตรนั้นมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V(r) = \frac{\rho_v(r_1)\Delta v_1}{4\pi\epsilon_0|r-r_1|} + \frac{\rho_v(r_2)\Delta v_2}{4\pi\epsilon_0|r-r_2|} + \dots + \frac{\rho_v(r_n)\Delta v_n}{4\pi\epsilon_0|r-r_n|}$$

หากให้จำนวนประจุที่เพิ่มเข้าไปเข้าใกล้อนันต์สมการจะกลายเป็นความสัมพันธ์ทางอินทิกรัล

$$V(r) = \int \frac{\rho_v(r')dv'}{4\pi\epsilon_0|r-r'|}$$

เมื่อต้องการหาค่าสนามศักย์ที่ระยะห่างจากประจุแบบจุด จากสมการข้างต้นจะพบว่า ศักย์ไฟฟ้า $V(r)$ เทียบกับศักย์อ้างอิงศูนย์ที่จุดอนันต์และวัดจากงานที่กระทำในการนำประจุหนึ่งหน่วยจากอนันต์ภายใต้สนามไฟฟ้ามายังจุด r ที่จะหาค่าศักย์นั้นก่อนประจุที่มีความหนาแน่น $\rho_v(r')$ และส่วนของปริมาตรเชิงอนุพันธ์ dv' รวมกันกลายเป็นประจุที่อยู่ภายในปริมาตรเชิงอนุพันธ์ $\rho_v(r')dv'$ อยู่ที่ตำแหน่ง r' ส่วนระยะ $|r-r'|$ คือระยะจากจุดที่เป็นแหล่งจ่ายไปยังจุดที่พิจารณาสนามศักย์อินทิกรัลที่ได้เป็นแบบ 3 ชั้น(เชิงปริมาตร) ถ้าประจุกระจายอยู่ในรูปแบบเส้นประจุหรือกระจายออกเป็นแผ่นประจุแล้วศักย์ไฟฟ้าที่หาได้จะมาจากการอินทิเกรตไปตามแนวเส้นประจุหรือตามพื้นที่ผิวของประจุนั้นคือ

$$V(r) = \int \frac{\rho_L(r')dL'}{4\pi\epsilon_0|r-r'|}$$

$$V(r) = \int \frac{\rho_s(r')dS'}{4\pi\epsilon_0|r-r'|}$$

สมการการอินทิเกรตของศักย์ไฟฟ้าจะอยู่ในเทอมของการกระจายของประจุที่มีความคล้ายคลึงกันมากเมื่อเทียบกับสมการความเข้มสนามไฟฟ้าคือ

$$E(r) = \int \frac{\rho_v(r')dv'}{4\pi\epsilon_0|r-r'|^2} \frac{r-r'}{|r-r'|}$$

และจากข้อกำหนดที่ว่าจะไม่มีการเกิดขึ้นเมื่อทำการเคลื่อนประจุนครบรอบในเส้นทางหนึ่ง

$$\oint E \cdot dL = 0$$

สมการข้างต้นจะเป็นจริงเสมอในเงื่อนไขสำหรับสนามสถิตย์ สนามใดที่เป็นสนามอนุรักษ์ (Conservative field) เมื่ออินทิเกรตตรงเส้นทางปิดของสนามจะมีค่าเป็นศูนย์

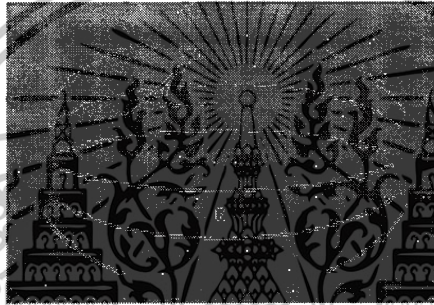
2.2.15 เกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า(Potential Gradient)

ในการคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าเราสามารถหาได้โดยตรงจากความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยการอินทิเกรตตามเส้นทางที่กำหนดและสามารถหาได้จากการกระจายอย่างง่ายของประจุเองโดยการแยกสักรวมเป็นเอกสักรหัสทรงกลมไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในทางปฏิบัติไม่ทราบว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทิเกรตเชิงปริมาตรของประจุแต่ในทางปฏิบัติแล้วเราไม่สามารถทราบค่าของสนามและการกระจายของประจุได้เสมอไป จากข้อมูลที่บรรยายถึงผิวที่มีศักย์เท่ากัน 2 ผิวสมมติว่ามีแผ่นตัวนำคู่ขนานกันสองแผ่นที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมมีศักย์ไฟฟ้าที่ตรงข้ามกันหากต้องการทราบค่าของการเก็บประจุของตัวนำทั้งสองหรือตัวแปรประจุและกระแสที่กระจายอยู่บนตัวนำนั้น ปริมาณเหล่านี้อาจจะหามาได้จากสนามศักย์ไฟฟ้าและเป้าหมายหลักคือการหาวิธีที่ง่ายสำหรับการหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าโดยตรง จากสมการความสัมพันธ์ทางการอินทิเกรตเชิงเส้นของปริมาณทั้งสอง

$$V = -\int E \cdot dl$$

จะง่ายกว่าถ้าเราพิจารณาค่าในทางกลับกัน โดยหา V จาก E



ภาพที่ 2.19 เวกเตอร์ความยาวที่เพิ่มขึ้นเป็น ΔL ทำมุม θ กับสนาม E

จากสมการอาจจะใช้ทิศทางของ ΔL ไปตามสนาม E ที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งอาจจะเป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ ΔV ในย่านความยาวนี้เป็น

$$\Delta V = -E \Delta L$$

เมื่อพิจารณาพื้นที่ในปริมาตรหนึ่งดังรูปซึ่งทั้ง E และ V มีค่าเปลี่ยนไปเมื่อเลื่อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจากสมการให้เลือกเวกเตอร์ของความยาว $\Delta L = \Delta L a_L$ ที่สนามไฟฟ้า E มีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทาง a_L คูณด้วยขนาดของสนาม(เป็นการคูณแบบจุด)เพื่อหาค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดตั้งต้นและจุดสุดท้ายของ ΔL ถ้าเราให้มุมระหว่าง ΔL กับ E มีค่าเป็น θ จะได้

$$\Delta V = -E \Delta L \cos \theta$$

หากสมมติว่าจุดอ้างอิงเริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์และจุดปลายอยู่ที่ (x, y, z) เราทราบว่าผลการอินทิเกรตได้เป็นฟังก์ชันเดียวกันกับจุดปลาย (x, y, z) เพราะว่าสนาม E เป็นสนามอนุรักษ์ดังนั้น V จึงมีค่าเป็นฟังก์ชันของ (x, y, z) อย่างเดียวกัน เราจะได้

$$\frac{dV}{dL} = -E \cos \theta$$

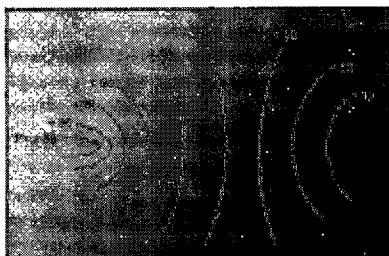
เราใส่ ΔL ในทิศทางใดเพื่อให้ได้ ΔV มีค่าสูงสุดและพึงระวังว่า E เป็นค่าที่เรากำหนดที่จุดที่เราทำงานอยู่โดยมีค่าขึ้นกับทิศของ ΔL แต่ขนาดของ ΔL เป็นค่าคงที่ ส่วนตัวแปรในที่นี้คือ a_L ซึ่งเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ ΔL จึงเห็นได้ว่าการเพิ่มค่าสูงสุดในทางบวกของศักย์ไฟฟ้า ΔV_{\max} จะเกิดขึ้นเมื่อ $\cos \theta$ เป็น -1 หรือที่จุด ΔL มีทิศทางตรงข้ามกับ E ซึ่งสามารถเขียนเงื่อนไขได้เป็น

$$\left. \frac{dV}{dL} \right|_{\max} = E$$

ซึ่งจะพบความสัมพันธ์ที่สำคัญ 2 ประการสำหรับ E กับ V ที่จุดใดๆ

1. ขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของศักย์ไฟฟ้าต่อระยะทาง
2. ขนาดสูงสุดนี้หาได้เมื่อระยะทางที่เพิ่มขึ้นมีทิศตรงข้ามกับทิศของ E หรืออาจกล่าวได้ว่าทิศของ E มีทิศตรงข้ามกับทิศของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าแสดงดังรูป จากข้อมูลที่ได้ของสนามศักย์ไฟฟ้าคือเส้นหรือผิวสมศักย์ในสองมิติเราจะพิจารณาข้อมูลของความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด P โดยที่จุด P วางแนวการเพิ่มค่าระยะทางสั้นๆ ΔL ไปในทิศทางต่างๆโดยเน้นเฉพาะแนวที่ศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ได้ศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นไปในทิศทางด้านซ้ายและจากคุณสมบัติข้อ 2 ความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีทิศจะมีทิศในทางตรงข้ามคือไปทางขวามือของจุด P ขนาดที่ได้หาจากผลหารของศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปกับระยะทาง



ภาพที่ 2.20 สนามศักย์ไฟฟ้าที่แสดงโดยผิวสมศักย์ ที่จุดต่างๆบนผิวสมศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนาม E ตั้งฉากกับผิวสมศักย์

ทิศทางที่ศักย์เพิ่มขึ้นนี้จะตั้งฉากกับเส้นสมศักย์และจะเป็นจริงถ้าให้ ΔL วางขนานไปตามเส้นสมศักย์จะทำให้ $\Delta V = 0$ จากนิยามของผิวสมศักย์จะได้

$$\Delta V = -E \Delta L = 0$$

เนื่องจากไม่มีค่า E หรือ ΔL ที่เป็นศูนย์ดังนั้น E จะต้องตั้งฉากกับ ΔL หรือตั้งฉากกับผิวศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากัน ดังนั้นจะต้องคำนวณหาข้อมูลของสนามศักย์ไฟฟ้าก่อน และเมื่อจะพิจารณาทิศทางของ ΔL ที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด เทอมของสนามศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นไปได้มากกว่าเทอมของความเข้มสนามไฟฟ้างั้นจึงมีการใส่เวกเตอร์หน่วย a_N ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวสมศักย์ที่ชี้ตรงไปยังทิศทางที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าความเข้มสนามไฟฟ้าจึงเขียนในเทอมของศักย์ไฟฟ้าได้

$$E = \left. \frac{dV}{dL} \right|_{\max} a_N$$

แสดงว่าขนาดของ E ได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อระยะทางสูงสุดของ V และทิศทางของ E เป็นทิศทางตั้งฉากกับผิวสมศักย์ (ในทิศที่ศักย์มีค่าลดลง) ดังนั้น $dV/dL|_{\max}$ จะเกิดขึ้นเมื่อ ΔL มีทิศทางเดียวกับ a_N เราอาจจะเขียนสมการนี้ได้เป็น

$$\left. \frac{dV}{dL} \right|_{\max} = \frac{dV}{dN}$$

$$E = \frac{dV}{dN} a_N$$

ซึ่งอธิบายความหมายทางฟิสิกส์เพื่อหาค่าความเข้มสนาม E จากศักย์ไฟฟ้า กระบวนการหา V จาก E นี้ไม่มีความเป็นหนึ่ง (Unique) เพราะค่าทั้งสองไม่ได้เป็นชนิดเดียวกันแต่เนื่องจากว่าการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามสเกลาร์กับสนามเวกเตอร์นั้นสามารถใช้ได้กับการวิเคราะห์ทางเวกเตอร์ได้เสมอ การกระทำต่อ V เพื่อให้ได้ค่า $-E$ คือเกรเดียนต์ (Gradient) โดยเกรเดียนต์ของสนามสเกลาร์ T มีนิยามเป็น

$$\text{เกรเดียนต์ของ } T = \text{grad } T = \frac{dT}{dN} a_N$$

เมื่อ a_N คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผิวสมศักย์ซึ่งมีการตั้งฉากกับจุดที่เลือกในทิศทางที่ T มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการใช้เทอมใหม่นี้เราจึงเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ E ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = -\text{grad } T$$

เนื่องจากเคยแสดงให้เห็นแล้วว่า V เป็นฟังก์ชันที่แน่นอนของ x, y, z จึงอาจใช้อนุพันธ์รวมได้เป็น

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

แต่เราเคยมี

$$dV = -E \cdot dL = -E_x dx - E_y dy - E_z dz$$

ดังนั้นสมการทั้งสองจะเป็นจริงที่ทุกๆค่าของ dx, dy, dz

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}$$

$$E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}$$

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

เมื่อเอาผลลัพธ์นี้มารวมกันทางเวกเตอร์จะได้เป็น

$$E_z = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} a_x + \frac{\partial V}{\partial y} a_y + \frac{\partial V}{\partial z} a_z \right)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการและจัดรูปใหม่จะได้เกรเดียนต์ของฟังก์ชันเป็น

$$\text{grad } V = \frac{\partial V}{\partial x} a_x + \frac{\partial V}{\partial y} a_y + \frac{\partial V}{\partial z} a_z$$

เกรเดียนต์ของสเกลาร์จะให้ค่าเป็นเวกเตอร์ ความสัมพันธ์ทางเกรเดียนต์เป็นคำอธิบายอย่างหนึ่งในทางฟิสิกส์จากสมการแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางสูงสุดของปริมาณสเกลาร์และทิศทางที่ได้เมื่อค่าสูงสุดเกิดขึ้นนั้นก็เป็นธรรมชาติทางเวกเตอร์ของเกรเดียนต์เอง

2.2.16 โอเปอเรเตอร์เวกเตอร์

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} a_x + \frac{\partial}{\partial y} a_y + \frac{\partial}{\partial z} a_z$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำไปใส่เป็นโอเปอเรเตอร์กระทำกับสเกลาร์ T เป็น ∇T จะได้

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} a_x + \frac{\partial T}{\partial y} a_y + \frac{\partial T}{\partial z} a_z$$

เขียนได้เป็น $\nabla T = \text{grad } T$

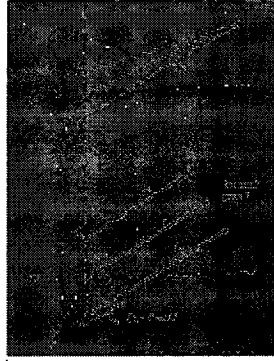
ทำให้เขียนสมการระหว่าง E กับ V ได้เป็น

$$E = -\nabla V$$

นอกจากนี้เกรเดียนต์ยังสามารถเขียนได้ในเทอมของอนุพันธ์ย่อยในระบบพิกัดอื่นๆ ทั้งพิกัดทรงกลม และพิกัดทรงกระบอก

2.2.17 ไดโพล(Dipole)

สนามเนื่องจากไดโพล เป็นสนามที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นพฤติกรรมพื้นฐานสำหรับสารไดอิเล็กตริกที่มีต่อสนามไฟฟ้า และได้มีการปรับให้เข้ากับวิธีการคำนวณโดยใช้วิธีภาพจำลองและได้มาจากการพิจารณาหลักการเรื่องของศักย์ไฟฟ้า ไดโพลไฟฟ้านั้นเป็นชื่อของประจุไฟฟ้าคู่หนึ่งที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามวางห่างกันด้วยระยะทางใกล้มากเมื่อเทียบกับระยะทางระหว่างประจุทั้งสองไปยังจุด P ที่เป็นจุดที่ต้องการหาค่าสนามและศักย์ไฟฟ้าประจุไดโพลแสดงดังรูป ระยะห่างระหว่างประจุทั้งสองไปยังจุด P อธิบายได้โดยใช้หลักของระบบพิกัดทรงกลม r, θ และ $\phi = 90^\circ$ ซึ่งอยู่ในมุมมองที่สมมาตรตามแนวราบประจวบและประจุบทั้งสองมีระยะห่างต่อกัน d และมีพิกัดฉากเป็น $(0, 0, d/2)$ และ $(0, 0, -d/2)$ ตามลำดับ การจะหาความเข้มสนามไฟฟ้าโดยการรวมค่าของสนามที่ได้จากประจุทีละประจุเข้าด้วยกันหรือหาค่าศักย์ไฟฟ้าก่อนเป็นอย่างไรซึ่งจะง่ายกว่าวิธีแรก แต่ทั้ง 2 วิธีสามารถหาค่าหนึ่งจากอีกค่าหนึ่งได้



ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของไดโพลไฟฟ้าที่อยู่ในทิศ a , สำหรับระยะทางจากไดโพลไปยังจุด P

หากเลือกหาค่าสนาม E ก่อนเราจำเป็นต้องพิจารณา 2 ส่วนประกอบซึ่งอยู่ในระบบพิกัดทรงกลม(เพราะจากความสมมาตรทำให้ทราบว่า E , มีค่าเป็นศูนย์) จากนั้นจะสามารถหาค่า V จาก E ด้วยการอินทิเกรตเชิงเส้นและในตอนสุดท้ายจะมีการกำหนดศักย์อ้างอิงศูนย์ด้วย เนื่องจากการอินทิเกรตเชิงเส้นสามารถหาได้จากเฉพาะความต่างศักย์ที่จุด 2 จุดที่อยู่ปลายทางของเส้นทางอินทิกรัลเท่านั้น ในอีกทางหนึ่งเราอาจจะเลือกคำนวณศักย์ไฟฟ้าก่อนซึ่งจะเป็นวิธีการที่ง่าย ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากเรหาค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งแต่ละจุดก่อน แล้วนำมารวมกันในเชิงสเกลาร์และเนื่องจากทิศทางของเวกเตอร์ E ที่ขึ้นกับตำแหน่งที่พิจารณานั้นจะคำนวณได้ง่ายโดยการใช้ค่าลบของเกรเดียนต์ V ซึ่งวิธีการนี้ทำได้ง่ายกว่าซึ่งจะให้ระยะจาก Q และ $-Q$ ไปยังจุด P ไปยัง R_1 และ R_2 ตามลำดับสามารถเขียนศักย์ไฟฟ้าได้เป็น

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2}$$

จะสังเกตได้ว่าที่ระนาบ $z=0$ เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างประจุทั้งสองและเป็นจุดที่อยู่ในแนวซึ่ง $R_1 = R_2$ เสมอ ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้ารวมเป็นศูนย์ที่ทุกๆ จุดตามแนวนั้นจนถึงระยะอนันต์

สำหรับระยะซึ่งเป็นจุดที่ $R_1 = R_2$ และผลคูณของ $R_1 R_2$ ที่เป็นตัวหารอาจจะแทนได้ด้วย r^2 ซึ่งเทอมนี้ไม่อาจประมาณค่าได้เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในคำตอบเมื่อศักย์ไฟฟ้าเข้าใกล้ศูนย์ขณะที่เราพิจารณาที่ระยะห่างไกลมาจากประจุไดโพลเมื่อพิจารณาจะเห็นว่า $R_1 - R_2$ อาจประมาณค่าอย่างง่าย ๆ โดยให้ $R_1 R_2$ ขนานกัน จะได้

$$R_1 - R_2 = d \cos \theta$$

จะได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็น

$$V = \frac{Qd \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรดสังเกตอีกครั้งที่ระนาบ $z=0$ ($\theta=90^\circ$) เป็นระนาบที่มีศักย์เป็นศูนย์ โดยการใช้ความสัมพันธ์เกรเดียนต์ในระบบพิกัดทรงกลม

$$E = -\nabla V = -\left(\frac{\partial V}{\partial r}a_r + \frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}a_\theta + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial V}{\partial \phi}a_\phi\right)$$

$$\text{จะได้ } E = -\left(\frac{Qd \cos\theta}{2\pi\epsilon_0 r^3}a_r - \frac{Qd \sin\theta}{4\pi\epsilon_0 r^3}a_\theta\right)$$

หรือ $E = \frac{Qd}{4\pi\epsilon_0 r^3}(2\cos\theta a_r + \sin\theta a_\theta)$ ซึ่งเป็นสนามที่ระยะใดๆ จากไดโพล



ภาพที่ 2.22 สนามไฟฟ้าสถิตของจุดไดโพลที่มีโมเมนต์อยู่ในทิศ a_z พร้อมกับผิวสมศักย์ 6 ค่า

สนามศักย์ไฟฟ้าที่จะนำไปวาดเป็นแบบร่างที่เลือกเฉพาะไดโพลที่มี $Qd/(4\pi\epsilon_0)=1$ และจะได้ $\cos\theta = Vr^2$ เมื่อนำไปวาดเป็นเส้นดังรูปจะพบว่าแต่ละเส้นสอดคล้องกับเส้นสมศักย์สำหรับที่ $V=0, +0.2, +0.4, +0.6, +0.8, +1$ แกนของไดโพลอยู่ในแนวตั้งซึ่งมีประจุบวกอยู่ด้านบน เส้นกระแสวิกของสนามไฟฟ้าหาได้จาก

$$\frac{E_\theta}{E_r} = \frac{rd\theta}{dr} = \frac{\sin\theta}{2\cos\theta}$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{dr}{r} = 2\cot\theta d\theta$$

$$\text{จากนั้นจะได้ } r = C_1 \sin^2\theta$$

เส้นกระแสในแนวอนในรูป นั้นวาดสำหรับค่า $C_1 = 1, 1.5, 2$ และ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามศักย์ไฟฟ้าของไดโพลตามสมการอาจจะเขียนได้ง่ายขึ้นโดยการนิยามไดโพลโมเมนต์(dipole moment)ขึ้นมาใช้งานโดยในขั้นแรกการกำหนดเวกเตอร์ระยะห่างระหว่างประจุไดโพลมีทิศทาง จาก $-Q$ จนถึง $+Q$ เป็น d แล้วกำหนดให้ไดโพลโมเมนต์เป็น Qd โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย p ดังนั้น

$$p = Qd$$

หน่วยของ p คือ $C \cdot m$

เนื่องจากว่า $d \cos \theta = d \cos \theta$ จะได้

$$V = \frac{p \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

ผลลัพธ์ที่ได้อาจจะเขียนในรูปสมการทั่วไปได้เป็น

$$V = \frac{p \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 |r - r'|^2} p \frac{r - r'}{|r - r'|}$$

เมื่อ r คือระยะห่างระหว่างจุด p ที่พิจารณาสนาม และ r' คือระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของไดโพล จากสมการเป็นสมการที่ไม่ขึ้นกับระบบพิกัดใดๆ เมื่อไดโพลโมเมนต์ p นำมาใช้ในการพิจารณาอีกครั้งในสารไดอิเล็กตริก ทั้งไดโพลโมเมนต์และศักย์ไฟฟ้าจะไม่แปรตามค่า Q ที่เพิ่มขึ้นและ d ที่ลดลง เนื่องจากว่าเป็นผลคูณของประจุและระยะห่างระหว่างประจุ ตราบใดที่ผลคูณนี้ยังเป็นค่าคงที่อยู่ที่ ข้อจำกัดของไดโพลแบบจุดก็คือเมื่อเราให้ระยะ d เข้าใกล้ศูนย์และขนาดของ Q เข้าใกล้ค่าอนันต์เพราะว่าผลคูณ p ต้องเป็นค่าจำกัด

เมื่อย้อนกลับมาสนใจผลลัพธ์ของสนามอีกครั้งจะพบว่าสนามศักย์ไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะห่างไดโพลกำลังสอง ส่วนสนามไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่างจากไดโพลยกกำลังสาม สนามทั้งสองลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับสนามที่ได้จากประจุแบบจุด แต่หากพิจารณาว่าประจุที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามวางอยู่ใกล้กันมากถ้าพิจารณาระยะที่ห่างออกไปมากๆก็จะมองคล้ายกับว่าประจรรวมมีค่าเป็นศูนย์ลุลอมบ์ หากจัดให้มีประจุสมมาตรเป็นจำนวนมากจะทำให้สนามแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เรียกการกระจายประจุแบบนี้ว่ามัลติโพล(Multipole)ซึ่งมีการคำนวณค่าประมาณโดยใช้อนุกรมอนันต์สำหรับหาโครงสร้างประจุแบบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.18 สารไดอิเล็กตริก

เมื่อพิจารณาสารที่เป็นฉนวนหรือสารไดอิเล็กตริก(dielectrics) ซึ่งจะแตกต่างจากสารที่เป็นตัวนำ ในทางอุดมคติคือ ไม่มีประจุอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ในเนื้อสารซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำ ดังนั้นประจุทั้งหมดจะถูกกักอยู่ในโมเลกุลหรือโครงข่ายของโมเลกุลด้วยแรงดึงดูดบดบังนั้นเมื่อใส่ สนามไฟฟ้าเข้าไปในเนื้อสารจะทำให้ประจุเคลื่อนตัวหรือปิดตัวเพียงเล็กน้อยแต่ไม่เคลื่อนที่ออกนอก ตำแหน่งปรกติ ซึ่งจะสร้างเป็นชุดของโครงสร้างไดโพลไฟฟ้า(electric dipole) เกิดขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ สามารถอธิบายต่อไปถึงการวัดค่าความยินยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permeability) หรือค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) และเมื่อเกิดการแยกออกเป็นสองขั้วหรือโพลาริเซชัน (Polarization) ของตัวกลางซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและทิศทางที่แตกต่างกันไปของ ชนิดสารไดอิเล็กตริกที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้านั้น ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะแตกต่างจากค่าที่วัดได้จากที่ว่างอิสระ นอกจากนี้ยังมีการสร้างเงื่อนไขขอบเขตต่างๆสำหรับสนามที่สัมผัสกับผิวที่บริเวณรอยต่อ ระหว่างสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดเพิ่มเติมเพื่อที่จะอธิบายความแตกต่างของสารเหล่านั้น

จากการเคลื่อนที่หรือการปิดตัวของประจุทำให้เกิดการสะสมพลังงานขึ้นและจากหลักการนี้ สามารถนำมาออกแบบสร้างตัวเก็บประจุ(Capacitor) และจากการตอบสนองของสาร ไดอิเล็กตริก โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อสนามที่แปรตามเวลา ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสำคัญมากต่อการทำความเข้าใจ ปรากฏการณ์ต่างๆทางฟิสิกส์ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเครื่องเครื่องมือที่จะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ต่อไป เนื่องจากสารส่วนใหญ่มีคุณสมบัติที่เป็นได้ทั้ง ไดอิเล็กตริกและตัวนำ ซึ่งแปลว่าสารไดอิเล็กตริก อาจจะมีความเป็นตัวนำแฝงอยู่เล็กน้อยและสารบางอย่างที่พิจารณาว่าเป็นตัวนำอาจจะมีคุณสมบัติของ ไดอิเล็กตริกแฝงอยู่ด้วยเช่นกันซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารได้ จากการวิเคราะห์สารไดอิเล็กตริกสามารถนำไปสู่การพิจารณาตัวเก็บประจุ โดยเฉพาะการหาค่าความจุ ไฟฟ้าจากโครงสร้างระหว่างตัวนำกับไดอิเล็กตริก

2.2.19 ธรรมชาติของสารไดอิเล็กตริก

เมื่อสารไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าเราสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกันกับที่ว่างอิสระเมื่อ มีการจัดเรียงตัวของไดโพลที่เล็กมาก ซึ่งเกิดจากประจุบวกและประจุลบของไดโพลที่ไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากหากไม่มีประจุอิสระในเนื้อสารก็จะไม่สามารถเกิดการเหนี่ยวนำของกระแสขึ้นมาได้ผลของ

เอ็กสารนี้เป็นเอ็กสารที่ส่วในไว้ส่หรับการเงนในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าภายนอกจะส่งผลกระทบต่อประจุที่ยึดเหนี่ยวกันทางอะตอมและโมเลกุล สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย เรียกได้ว่าเป็นประจุยึดเหนี่ยว (Bound Charge) ซึ่งมีค่าตรงข้ามกับประจุอิสระ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าความนำของสาร ประจุยึดเหนี่ยวนี้จะทำตัวเป็นแหล่งจ่ายเสมือนที่จ่ายสนามไฟฟ้าสถิตได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเสนอตัวแปรใหม่คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือพิจารณาค่าความยินยอมไฟฟ้าจากกรณีของค่าความยินยอมไฟฟ้าในที่ว่างอิสระจากวิธีการที่ต่างออกไปเราสามารถนำไปใช้สร้างทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสารไดอิเล็กตริกโดยให้ความสำคัญกับโพลาริเซชัน P ค่าความยินยอมไฟฟ้า ϵ และค่าความยินยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ϵ_r รวมทั้งการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้ สารไดอิเล็กตริกทั้งหมดมีคุณสมบัติเป็นคุณสมบัติร่วมไม่ว่าจะเป็นสารที่มีสถานะของแข็ง ก๊าซ ผลึก คุณสมบัติเหล่านั้นคือความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้า การเก็บพลังงานไฟฟ้านี้จะหมายถึงการเคลื่อนตำแหน่งภายในที่ประจุยึดเหนี่ยวบวกและลบต้านกับแรงอะตอมใน โมเลกุลปรกติ การเคลื่อนหรือบิดตัวต้านกับแรงที่ควบคุมอยู่นี้เปรียบเสมือนการยืดตัวของสปริงเพื่อด้านพลังงานศักย์ แหล่งจ่ายพลังงานนี้คือสนามไฟฟ้าจากภายนอก ส่วนการเคลื่อนที่ของประจุเพียงเล็กน้อยนี้อาจจะเกิดขึ้นจากกระแสที่กระชากจากแบตเตอรี่ซึ่งเป็นตัวกลางตัวสร้างสนาม กลไกที่ทำให้ประจุเคลื่อนที่จะแตกต่างกันไปตามความแตกต่างของสาร ไดอิเล็กตริกบาง โมเลกุลที่อยู่ในเทอมของโมเลกุลแบบมีขั้ว อาจจะมีการเคลื่อนตัวอย่างถาวรระหว่างศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของประจุบวกและลบจากนั้นประจุแต่ละคู่จะทำตัวเป็นไดโพลปรกติ ไดโพลจะจัดเรียงตัวกันอย่างอิสระในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบตลอดทั่วทั้งภายในเนื้อสารและจะมีการจัดเรียง โมเลกุลตามสนามที่จ่ายมาจากภายนอกในทิศทางเดียวกัน สนามที่มีความเข้มมากจะทำให้เกิดการเคลื่อนของประจุบวกและประจุลบมากขึ้น เมื่อ โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar molecule) จะไม่มีการจัดเรียงกันเป็นไดโพลจนกว่าจะมีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปประจุทั้งบวกและลบจะเคลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้ามตามทิศทางที่สวนกับการเหนี่ยวนำโดยสนามภายนอกนั้นและทำให้เกิดไดโพลขึ้นซึ่งจะจัดเรียงกันไปตามสนามไฟฟ้า ไดโพลชนิดต่างๆสามารถอธิบายได้ด้วยไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) p ที่ได้กำหนดขึ้นมาจาก $p = Qd$

เมื่อ Q คือขนาดของประจุบวกในกลุ่มประจุที่จับกันเป็นไดโพล และ d คือเวกเตอร์ของระยะระหว่างประจุลบและประจุบวกซึ่ง p มีหน่วยเป็นคูลอมบ์-เมตร

หากพิจารณาปริมาตรในหนึ่งหน่วยมีจำนวนไดโพลอยู่ n ไดโพลจะพบว่าภายในปริมาตร Δv มีจำนวนไดโพลทั้งหมด $n\Delta v$ ไดโพล ไดโพลโมเมนต์ทั้งหมดที่ได้เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$p_{total} = \sum_{i=1}^{n\Delta v} p_i$ ถ้าไดโพลทั้งหมดถูกจัดเรียงอยู่ในทิศทางเดียวกัน p_{total} จะมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาตรที่พิจารณา อย่างไรก็ตามในการจัดเรียงแบบไม่เป็นระเบียบก็ยังคงเป็นผลทำให้ p_{total} มีค่ารวมเป็นศูนย์ จากนิยามของโพลาไรเซชัน(Polarization) คือจำนวนไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$p = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^{n\Delta v} p_i$$

มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อตารางเมตร เมื่อให้ p เป็นเสมือนสนามแบบสม่ำเสมอแม้ว่า p จะเป็นส่วนประกอบที่ไม่สามารถระบุออกมาอย่างชัดเจน ณ จุดใดจุดหนึ่งภายในอะตอมหรือโมเลกุลใดๆก็ตาม ควรทำความเข้าใจว่าค่าของมันเป็นค่าเฉลี่ยในปริมาตรที่ลุ่มขึ้นมาปริมาตรหนึ่งโดยให้เป็น Δv ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับการเป็นที่อยู่ของโมเลกุลจำนวนหนึ่งและมีขนาดเล็กพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าภายในปริมาตรนั้นได้ ในการแสดงถึงความหนาแน่นประจุยึดเหนี่ยวในปริมาตรหนึ่งพิจารณาเช่นเดียวกันกับความหนาแน่นประจุอิสระภายในปริมาตรหนึ่งที่เป็นแหล่งกำเนิดของสนามภายนอกทำให้ได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับกฎของเกาส์พิจารณาเช่นเดียวกันกับความหนาแน่นประจุอิสระภายในปริมาตรหนึ่งที่เป็นแหล่งกำเนิดของสนามภายนอกทำให้ได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับกฎของเกาส์ การพิจารณาเช่นนี้จะต้องกำหนดให้ไดอิเล็กตริกมีโมเลกุลที่ไม่มีการเรียงตัว ไม่มีโมเลกุลใดที่มีไดโพลโมเมนต์และโพลาไรเซชันมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดทั้งก้อนเนื้อสาร บริเวณใดๆในก้อนไดอิเล็กตริกเมื่อเลือกพื้นที่ผิวเล็กๆซึ่งกำหนดให้เป็น Δs แล้วใส่สนามไฟฟ้า E เข้าไปสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ $p = Qd$ ในแต่ละโมเลกุล โดยที่ทั้ง p และ d ทำมุม θ กับผิว Δs จากนั้นจะพิจารณา การขยายส่วนที่มีการเคลื่อนที่ของประจุยึดเหนี่ยวที่อยู่ระหว่างผิว Δs แต่ละประจุเป็นส่วนประกอบที่ได้จากโครงสร้างของไดโพลมีการเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง $1/2d \cos\theta$ ในทิศทางตั้งฉากกับผิว ดังนั้น ประจุบวกใดๆมีตำแหน่งเริ่มต้นที่ชั้นใต้ผิว Δs และเคลื่อนขึ้นไปอยู่ภายในระยะ $1/2d \cos\theta$ ของผิวที่หน้าตัด Δs ที่มีค่าเพิ่มขึ้น และประจุลบก็จะมีตำแหน่งเริ่มต้นที่ชั้นเหนือผิว Δs และเคลื่อนที่ลงไปอยู่ภายในระยะ $1/2d \cos\theta$ จากผิว Δs ที่พื้นที่หน้าตัด Δs มีค่าลดลงเนื่องจากว่ามีจำนวน n โมเลกุลต่อปริมาตรจึงทำให้จำนวนประจุทั้งหมดที่หน้าตัดของผิวด้านบนมีค่าเท่ากับ $nQd \cos\theta \Delta s$ หรือ $\Delta Q_0 = nQd \Delta s$ เมื่อ Q_0 เป็นตัวบ่งบอกว่ามันเป็นประจุยึดเหนี่ยวซึ่งไม่ใช่ประจุอิสระเราจึงหาค่าในเทอมของโพลาไรเซชันได้เป็น $\Delta Q_0 = P \Delta s$ ความหมายของ Δs เป็นปริมาณเวกเตอร์ของผิวปิดภายในสารไดอิเล็กตริกแล้ว

Δs จะมีทิศทางพุ่งออกและมีประจุที่เป็นประจุยึดเหนี่ยวรวมที่เพิ่มขึ้นในผิวปิดนี้หาได้จากการอินทิเกรตภายในผิวปิดนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_b = -\int_S P \cdot dS$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถสร้างนิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ขึ้นมาใหม่เพื่อนำไปใช้กับตัวกลางต่างๆที่ไม่ใช่ที่ว่างอิสระ สามารถเริ่มจากการเขียนกฎของเกาส์ในเทอมของ $\epsilon_0 E$ และ Q_r ซึ่งเป็นประจุทั้งหมดที่รวมทั้งประจุยึดเหนี่ยวและประจุอิสระที่อยู่ภายใน ได้เป็น $Q_r = \int_S \epsilon_0 E \cdot dS$ เมื่อ $Q_r = Q_b + Q$

และ Q คือประจุอิสระรวมภายในผิวปิด S และเมื่อรวมเอาสมการ 3 สมการข้างต้นเข้าด้วยกันจะได้สมการสำหรับประจุอิสระภายในผิวปิดนั้นได้เป็น

$$Q_r = Q_b + Q = \int_S \epsilon_0 (E + P) \cdot dS$$

เราสามารถกำหนดให้ D อยู่ในเทอมทั่วไปได้เป็น

$$D = \epsilon_0 E + P$$

เมื่อนำเทอม D รวมกับสมการที่ใช้กับสารที่มีปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันภายในจะได้สมการเป็น

$$Q = \int_S D \cdot dS$$

เมื่อ Q เป็นประจุอิสระที่อยู่ภายใน และหากแยกความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆในปริมาตรที่พิจารณาได้

$$Q_b = \int_V \rho_b \cdot dv$$

$$Q = \int_V \rho_v \cdot dv$$

$$Q_r = \int_V \rho_r \cdot dv$$

จากทฤษฎีโคเวอริเจนซ์สามารถสร้างสมการข้างต้นให้อยู่ในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ทางโคเวอริเจนซ์ได้เป็น

$$\Delta \cdot P = -\rho_b$$

$$\Delta \cdot \epsilon_0 E = -\rho_r$$

$$\Delta \cdot D = \rho_v$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำสมการไปใช้งานจำเป็นจะต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของความเข้มสนามไฟฟ้า E และโพลาไรเซชัน P เสียก่อนซึ่งในความสัมพันธ์นี้ต้องเป็นฟังก์ชันของชนิดเนื้อสารแต่ละจะจำกัดการวิเคราะห์ให้อยู่ในกลุ่มของสารพวกไอโซโทรปิก(isotropic)หรือพวกที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทางซึ่งเป็นสารพวกที่มี E และ P ขึ้นแก่กันอย่างเชิงเส้นในสารไอโซโทรปิกนี้เวกเตอร์ของ E และ P จะขนานกันไปเสมอซึ่งเป็นไปตามการจัดทิศทางของสนามเอง ในการใช้งานนั้นนิยมใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นเชิงเส้น การใส่สนามที่มีความเข้มพอประมาณจึงมีคุณสมบัติเป็นทิศทางเดียวแต่สาร โครงผลึกเดี่ยวอาจจะเป็นสารแอนไอโซโทรปิก(anisotropic)หรือมีคุณสมบัติขึ้นกับทิศทางเนื่องจากโครงสร้างของสารจะมีโครงสร้างที่ซ้ำกันเป็นช่วงๆในเนื้อสาร ซึ่งเป็นผลให้ไดโพลโมเมนต์จัดเรียงตัวกันตามแกนของผลึกได้ง่ายกว่าแต่อาจจะไม่เรียงกันตามทิศทางของสนามที่ใส่เข้าไปก็ได้ สารพวกเฟอร์โรอิเล็กตริก(Ferroelectric) หรือสารที่จ่ายสนามไฟฟ้าได้เองในตัวนั้นมีความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ P ไม่เพียงแต่จะเป็นเชิงเส้นเท่านั้นแต่ยังมีปรากฏการณ์ฮิสเทอโรซิส(Hysteresis)ซึ่งโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจากความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปจะขึ้นกับค่าคงที่คงค้างที่อยู่ภายในสารนั้นด้วย ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง E และ P คือ

$$P = \chi_e \epsilon_0 E$$

เมื่อ χ_e เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยเรียกว่า อิเล็กตริกซัสเซปทิลิตี(Electric susceptibility)หรือสภาพความไวทางไฟฟ้าของสาร เมื่อปรับรูปสมการและหาความสัมพันธ์จะได้

$$D = \epsilon_0 E + \chi_e \epsilon_0 E = (\chi_e + 1) \epsilon_0 E$$

$$\epsilon_r = \chi_e + 1$$

เป็นปริมาณอีกค่าหนึ่งที่ไม่มีหน่วยเช่นกันและเรียกว่าค่าความยินยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์(Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร(Dielectric constant)ของเนื้อสาร ดังนั้นจะได้

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E = \epsilon E \quad \text{เมื่อ} \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

เมื่อ ϵ คือค่าความยินยอมไฟฟ้า(Permittivity) ของสาร

สารไดอิเล็กตริกที่ไม่ใช่สารเนื้อเดียวไม่สามารถเขียนบรรยายในเทอมของสภาพความไวทางไฟฟ้าหรือความยินยอมทางไฟฟ้าอย่างง่ายได้เราพบว่าแต่ละส่วนประกอบของ D เป็นฟังก์ชันของทุกส่วนประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ E และ D ซึ่งมีค่าเท่ากับ ϵE ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการของเมตริกซ์ ซึ่งแต่ละส่วนประกอบของ D และ E เป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด 3×1 และ ϵ เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด 3×3

$$D_x = \epsilon_{xx}E_x + \epsilon_{xy}E_y + \epsilon_{xz}E_z$$

$$D_y = \epsilon_{yx}E_x + \epsilon_{yy}E_y + \epsilon_{yz}E_z$$

$$D_z = \epsilon_{zx}E_x + \epsilon_{zy}E_y + \epsilon_{zz}E_z$$

แต่ละส่วนของเมตริกซ์จะขึ้นอยู่กับทางเลือกแนวแกนของพิกัดในสารที่ไม่ใช่เนื้อเดียวการเลือกแกนที่แน่นอนจะทำให้ได้เมตริกซ์อย่างง่ายอันหนึ่ง

เนื่องจาก D และ E และ P อาจจะไม่ขนานกันเสมอไปถึงแม้ว่า $D = \epsilon_0 E + P$ จะเป็นสมการที่ใช้กับสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวก็ตามเราจะยังคงใช้ $D = \epsilon_0 E$ เท่านั้นโดยแปรความหมายสมการให้เป็นแบบสมการเมตริกซ์

และจะเน้นไปที่สารเนื้อเดียวแบบเชิงเส้นเท่านั้น หากพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับประจุอิสระถึงแม้ว่าจะจะเป็นความสัมพันธ์แบบจุดหรือแบบอินทิกรัลก็ตาม จากกฎของเกาส์

$$\nabla \cdot D = \rho_v$$

$$\oint D \cdot dS = Q$$

2.2.20 เงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อสำหรับสารไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (Boundary Condition for Perfect Dielectric Material)

ในการวิเคราะห์สารไดอิเล็กตริกสองชนิดที่ต่างกันที่วางติดกันหรือสารไดอิเล็กตริกกับตัวนำ ในกรณีของสารไดอิเล็กตริกกับตัวนำสำหรับเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ในบริเวณพื้นผิวด้านหน้าของตัวนำซึ่งมีสนามในแนวขนานกับผิวมีค่าเป็นศูนย์ ความหนาแน่นฟลักซ์ในทิศทางตั้งฉากมีค่าเท่ากับประจุที่ผิวตัวนำนั้น การหาคำตอบสามารถพิจารณาจากพฤติกรรมของสนามที่ผิวสัมผัสของสารไดอิเล็กตริก เมื่อพิจารณาผิวสัมผัสระหว่างไดอิเล็กตริกสองชนิดที่มีค่าความยินยอมทางไฟฟ้าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_1 และ ϵ_2 ในบริเวณของสารชนิดแรกและสารชนิดที่สองตามลำดับเมื่อพิจารณาตามรูป จะมีส่วนประกอบในแนวขนานเป็น

$$\oint E \cdot dL = 0$$

เมื่อวนรอบเส้นทางปิดเล็กๆทางด้านซ้ายของรูปจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$E_{\tan 1} \Delta w - E_{\tan 2} \Delta w = 0$$

ส่วนของเส้นทางย่อยที่อินทิกรัลเชิงเส้นมีส่วนประกอบ E ในแนวตั้งฉากตามทิศ Δh เราจะไม่พิจารณาเพราะ Δh มีค่าเข้าใกล้ศูนย์และเนื่องจากเส้นทางปิดนี้ครอบคลุมเฉพาะบริเวณที่ผิวสัมผัสเท่านั้น ทำให้ได้สมการเป็น

$$E_{\tan 1} = E_{\tan 2}$$

จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคิร์ชฮอฟฟ์จะสรุปได้ว่าความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดที่ผิวสัมผัสที่ห่างกันด้วยระยะทาง Δw มีค่าเท่ากันทั้งเหนือผิวสัมผัสและใต้ผิวสัมผัสของรอยต่อ ถ้าความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวขนานมีความต่อเนื่องเมื่อข้ามผิวรอยต่อแล้ว D ในแนวขนานจะไม่ต่อเนื่องเพราะ

$$\frac{D_{\tan 1}}{\epsilon_1} = E_{\tan 1} = E_{\tan 2} = \frac{D_{\tan 2}}{\epsilon_2}$$

$$\frac{D_{\tan 1}}{D_{\tan 2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

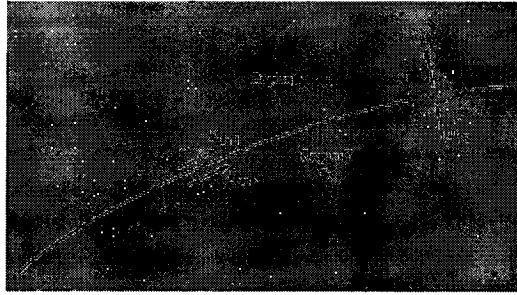
เงื่อนไขตรงผิวสัมผัสที่รอยต่อของส่วนประกอบในแนวตั้งฉากสามารถหาได้โดยใช้กฎของเกาส์กับกล่องเล็กๆที่แสดงไว้ในด้านขวาของผิวสัมผัสโดยให้แต่ละด้านของกล่องมีขนาดเล็กมากโดยมีฟลักซ์ไฟฟ้าทะลุผ่านด้านบนและด้านล่างของกล่องมีค่าผลต่างเป็น

$$D_{N1} \Delta S - D_{N2} \Delta S = \Delta Q = \rho_s \Delta S$$

จากนั้นจะได้

$$D_{N1} - D_{N2} = \rho_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.23 ผิวสัมผัสที่รอยต่อระหว่างสาร ไดอิเล็กตริกสมบูรณ 2 ชนิดที่มีค่าความยินยอมไฟฟ้า ϵ_1, ϵ_2

เราจะไม่พิจารณาความหนาแน่นประจุที่ผิวเพราะได้กำหนดให้โพลาไรด์เซชันของสารไดอิเล็กตริกที่ได้รับผลมาจากสนามไฟฟ้าแปรเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังนั้นจึงพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแทนการพิจารณาประจุยึดเหนี่ยวผลที่ได้จึงเปรียบเสมือนไม่มีประจุที่ผิว และไม่มีประจุอิสระที่ผิวของไดอิเล็กตริกสมบูรณประจุที่ว้านี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการใส่ประจุเพิ่มเข้าไปดังนั้นจะเกิดความไม่สมดุลของประจรรวมขึ้นภายในสารไดอิเล็กตริกเราจึงสามารถสมมติให้ ρ_s มีค่าเป็นศูนย์ที่ผิวสัมผัสได้ซึ่งจะเป็นข้อยกเว้นพิเศษในการพิจารณาครั้งนี้เท่านั้น และจะได้

$$D_{N1} = D_{N2}$$

ในส่วนประกอบของ D มีความต่อเนื่องในแนวตั้งฉากผลที่ได้คือ

$$\epsilon E_{N1} = \epsilon E_{N2}$$

และจะพบว่าส่วนประกอบของ E ในแนวตั้งฉากมีความไม่ต่อเนื่อง จากเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อนำเอามาพิจารณาร่วมกันจะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ D และ E ที่ผิวสัมผัส ถ้าให้ D_1 (และ E_1) วางทำมุม θ_1 กับเส้นตั้งฉากของระนาบผิวสัมผัสตั้งในรูปเนื่องจากส่วนประกอบของ D ในแนวตั้งฉากมีความต่อเนื่อง

$$D_{N1} = D_1 \cos \theta_1 = D_2 \cos \theta_2 = D_{N2}$$

อัตราส่วนของส่วนประกอบในแนวขนานในสมการจะมีค่าเป็น

$$\frac{D_{\tan 1}}{D_{\tan 2}} = \frac{D \sin \theta_1}{D \sin \theta_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หารและจัดรูปสมการจะได้

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

จากสมการหากสมมติให้ $\epsilon_1 > \epsilon$ เพราะฉะนั้น $\theta_1 > \theta_2$

ทิศทางของ E บนแต่ละด้านของผิวสัมผัสจะมีทิศทางเดียวกันกับ D เพราะว่า $D = \epsilon E$ ขนาดของ D ในบริเวณที่สองอาจจะหาได้โดยตรงจากสมการ

$$D_2 = D_1 \sqrt{\cos^2 \theta_1 + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)^2 \sin^2 \theta_1}$$

และขนาดของ E_2 จะเป็น

$$E_2 = D_1 \sqrt{\sin^2 \theta_1 + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)^2 \cos^2 \theta_1}$$

จากการวิเคราะห์สมการแสดงว่า D มีค่ามากกว่าในบริเวณที่มีค่าอินยอมทางไฟฟ้าสูงกว่า(ยกเว้นในกรณีที่ $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ ซึ่งขนาดจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง) และ E มีค่าสูงกว่าในบริเวณที่มีค่าความอินยอมไฟฟ้าต่ำกว่า(ยกเว้นในกรณีที่ $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ ซึ่งขนาดจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง) จากเงื่อนไขรอยต่อสมการความสัมพันธ์ของขนาดและทิศทางทำให้เราสามารถหาสนามที่รอยต่อด้านใดด้านหนึ่งได้ถ้าหากทราบสนามที่รอยต่ออีกด้านหนึ่ง เงื่อนไขที่ผิวสัมผัสตรงรอยต่อของสาร ไดอิเล็กตริกเป็นเงื่อนไขที่ง่ายเริ่มจากการที่เราทราบ D และ E เป็นศูนย์ทั้งคู่ภายในตัวนำและจะพบว่าส่วนประกอบขนาดของทั้ง E และ D จะต้องเป็นศูนย์ด้วยทั้งคู่ของสมการ

$$\oint E \cdot dL = 0 \quad \text{และ} \quad D = \epsilon E$$

จากกฎของเกาส์

$$\oint E \cdot dS = Q$$

ทำให้ทราบว่าทั้ง E และ D ตั้งฉากกับผิวตัวนำแล้ว $D_N = \rho_s$ และ $E_N = \rho_s / \epsilon$ เราจะเห็นว่าเงื่อนไขรอยต่อที่ได้พัฒนามาจากเงื่อนไขที่แล้วสามารถนำมาพิจารณาใช้กับรอยต่อของตัวนำมีว่างอิสระสอดคล้องกับเงื่อนไขสำหรับรอยต่อของตัวนำไดอิเล็กตริกด้วยโดยแทนค่า ϵ_0 ด้วย ϵ ดังนั้น

$$D_t = E_t = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_N = \varepsilon E_N = \rho_s$$

การเปลี่ยนแปลงภายในตัวนำและที่ผิวตัวนำมีประจุที่ผิวได้อย่างไร จากกฎของโอห์ม

$$J = \sigma E$$

และจากสมการความต่อเนื่องของกระแส

$$\nabla \cdot J = \frac{-\partial \rho_v}{\partial t}$$

เนื่องจากทั้ง J และ ρ_v ต่างก็เป็นปริมาณที่ประกอบด้วยประจุมิติสละ เราจะได้

$$\nabla \cdot \sigma E = \frac{-\partial \rho_v}{\partial t}$$

หรือ

$$\nabla \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} D = \frac{-\partial \rho_v}{\partial t}$$

เมื่อพิจารณาค่ากลางเป็นสารเนื้อเดียวกันทั้ง σ และ ε จะไม่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งที่วิเคราะห์

$$\nabla \cdot D = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{\partial \rho_v}{\partial t}$$

เมื่อนำสมการของแมกซ์เวลล์มาช่วยพิจารณาจะได้ว่า

$$\rho_v = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{\partial \rho_v}{\partial t}$$

สมมติ σ ไม่เป็นฟังก์ชันของ ρ_v แต่ในความเป็นจริงแล้ว σ แปรตามทั้ง ρ_v และความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของมันแต่เราจะสมมติให้สมการมีความง่ายขึ้น เมื่ออินทิเกรตโดยตรงจะได้

$$\rho_v = \rho_0 e^{-(\sigma/\varepsilon)t}$$

เมื่อ ρ_0 คือความหนาแน่นของประจุที่เวลา $t=0$ สมการนี้แสดงถึงการลดลงของความหนาแน่นของประจุแบบเอกซ์โปเนนเชียลทุกขณะที่เวลาเปลี่ยนไปด้วยค่าเวลาคงตัวเป็น σ/ε ซึ่งมักจะเรียกกันว่าเวลาในการผ่อนคลายประจุ (Relaxation time) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเพื่อพิจารณาว่าวัสดุเป็นตัวนำชนิดดีหรือชนิดเลวได้ การลดลงอย่างรวดเร็วของประจุในวัสดุเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุเป็นตัวนำที่ดี และความหนาแน่นประจุจะมีค่าเป็นศูนย์ภายในตัวนำที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่นำมาใช้งานทางฟิสิกส์นั้นจะไม่มีสารไดอิเล็กตริกชนิดใดเลยที่ปราศจากประจุอิสระสารทั้งหมด มีค่าความนำที่ไม่เป็นศูนย์และประจุที่อยู่ภายในตัวกลางเหล่านั้นจะเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวในที่สุด

2.2.21 ค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาตัวนำสองแผ่นภายในที่ว่างระหว่างตัวนำทั้งสองมีสารไดอิเล็กตริกเนื้อเดียวบรรจุอยู่ (ดังรูป) ตัวนำ M_2 ใส่ประจุไว้ด้วย Q และตัวนำ M_1 ก็ใส่ประจุตรงข้ามที่มีจำนวนเท่ากันลงไปด้วยไม่มีประจุนอกจากนี้ จะพบว่าประจุมรวมทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากประจุจะกระจายอยู่บนผิวดำนำ เป็นความหนาแน่นประจุที่ผิวและสนามไฟฟ้าจะมีทิศตั้งฉากกับผิวดำนำเสมอตัวนำแต่ละด้านจะเป็นผิวสมศักย์เนื่องจาก M_1 เป็นประจุบวก ดังนั้นฟลักซ์ไฟฟ้าจึงมีทิศชี้จาก M_2 ไปยัง M_1 และ M_2 มีศักย์เป็นบวกมากกว่ากล่าวได้ว่างานที่ได้เป็นการเคลื่อนประจุจาก M_1 ไปยัง M_2 และเมื่อกำหนดให้ความต่างศักย์ระหว่าง M_2 และ M_1 เป็น V_0 เราจะนิยามให้ค่าการเก็บประจุหรือความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของระบบตัวนำไฟฟ้าทั้งสองเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดของประจุมบนตัวนำแต่ละตัวนำกับความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสองนั้นเป็น

$$C = \frac{Q}{V_0}$$

เมื่อคำนวณค่า Q จากอินทิกรัลเชิงผิวของตัวนำประจุบวกและหาค่า V_0 โดยการเคลื่อนประจุบวกหนึ่งหน่วยจากผิวดำนำลบไปยังตัวนำบวกสามารถนำเอาสมการมาเขียนในเทอมของอินทิกรัลได้เป็น

$$C = \frac{\int \epsilon E \cdot dS}{-\int E \cdot dL}$$

ค่าความจุไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับศักย์และประจุมเมื่ออัตราส่วนของค่าทั้งสองเป็นค่าคงที่ ถ้าค่าความหนาแน่นประจุมมีค่าเพิ่มขึ้นตามแฟกเตอร์ n แล้วกฎของเกาส์จะชี้ให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นฟลักซ์หรือความเข้มสนามไฟฟ้าก็มีค่าเพิ่มขึ้นตาม n ไปด้วยในขณะที่ค่าความต่างศักย์ก็เป็นเช่นเดียวกัน ค่าความจุไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของเพียงขนาดและรูปร่างกายภาพของระบบตัวนำและค่าความยินยอมทางไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริกชนิดเนื้อเดียวเท่านั้น ค่าความจุไฟฟ้าจะนิยมนวัดกันในหน่วยฟารัด (Farad, F) โดยที่ฟารัดนิยามมาจากหน่วยคูลอมบ์โดยทั่วไปแล้วค่าความจุไฟฟ้ามักมีค่าเป็นปริมาณที่เล็กมากของหน่วยฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าที่ใช้งานจริงมักอยู่ในช่วงของหน่วยไมโครฟารัด(μF)นาโนฟารัด(nF)และพิโคฟารัด(pF)เป็นส่วนใหญ่

กรณีระบบตัวนำสองชั้นที่มีรูปร่างแบบง่ายที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการเช่นตัวนำแผ่นคู่ขนาน กว้างยาวอนันต์ที่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับ d ดังแสดงในรูปกำหนดให้แผ่นตัวนำล่างวางที่ระนาบ z เท่ากับศูนย์และแผ่นตัวนำบนวางที่ระนาบ z เท่ากับ d มีประจุกระจายอย่างสม่ำเสมอบนตัวนำแต่ละตัวเท่ากับ $\pm\rho_s$ ที่ตัวนำแต่ละแผ่นจึงมีสนามสม่ำเสมอ

$$E = \frac{\rho_s}{\epsilon} a_z$$

เมื่อค่าความยินยอมทางไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริกเนื้อเดียวกันเป็น ϵ และ

$$D = \rho_s a_z$$

ประจุที่ระนาบของแผ่นตัวนำตัวล่างต้องมีค่าเป็นบวกเนื่องจาก D มีทิศขึ้นและค่าในส่วนประกอบตั้งฉากของ D คือ

$$D_N = D_z = \rho_s$$

เป็นค่าที่เท่ากับความหนาแน่นประจุที่ผิวนั่นเอง ส่วนที่ระนาบตัวนำแผ่นบน

$$D_N = -D_z$$

และความหนาแน่นประจุที่ผิวนี้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับที่ระนาบผิวล่าง ความต่างศักย์ระหว่างระนาบผิวบนกับผิวล่างเป็น

$$V_0 = - \int_{\text{upper}}^{\text{lower}} E \cdot dL = - \int_d^0 \frac{\rho_s}{\epsilon} dz = \frac{\rho_s}{\epsilon} d$$

เนื่องจากผลรวมค่าของค่าประจุที่ผิวของแผ่นตัวนำแต่ละตัวมีค่าเป็นอนันต์ ค่าความจุไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นอนันต์ด้วย การนำไปประยุกต์ใช้งานเพิ่มเติมคือการหาคำตอบจากการพิจารณาให้พื้นที่ของแผ่นตัวนำแต่ละแผ่นมีค่าจำกัดเป็น S ซึ่งมีขนาดกว้างมากกว่า d สนามไฟฟ้าและประจุยังคงกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอที่ทุกจุดบนแผ่นตัวนำทั้งสองโดยละเว้นการกระจายที่ขอบของแผ่นตัวนำ ซึ่งบริเวณที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าและประจุ ทำให้ค่าประจุไฟฟ้ารวมที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยมากทำให้ผลลัพธ์สามารถหาได้จากชุดสมการต่อไปนี้

$$Q = \rho_s S$$

$$V_0 = \frac{\rho_s d}{\epsilon}$$

หรือเราอาจพิจารณาให้สมการคือค่าความจุไฟฟ้าของส่วนของระนาบที่มีพื้นที่ S ในระนาบกว้างยาวประมาณอนันต์และสามารถหาค่าพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุได้ค่าเป็น

$$W_E = \frac{1}{2} \int_V \epsilon E^2 dv = \frac{1}{2} \int_0^d \int_0^S \frac{\epsilon \rho_s^2}{\epsilon^2} dz dS = \frac{1}{2} \frac{\rho_s^2}{\epsilon} S d = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{d} \frac{\rho_s^2}{\epsilon^2}$$

$$W_E = \frac{1}{2} C V_0^2 = \frac{1}{2} Q V_0 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

จะพบว่าพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุที่ได้จากค่าความต่างศักย์ที่คงที่ที่ดักคร่อมตัวเก็บประจุนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลางที่ใช้

2.2.22 การใช้ภาพร่างของสนามในการประมาณค่าความจุไฟฟ้าสำหรับกรณีสองมิติ

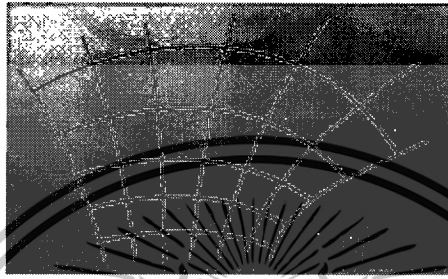
ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของระบบตัวนำแบบต่างๆหากไม่สามารถอธิบายในระบบพิกัดเดียวได้ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้การวิเคราะห์แบบอื่นเข้ามาช่วย วิธีที่นิยมใช้กันมากคือวิธีการแบบคำนวณเชิงเลข (Numerical Determination) ของค่าสนามหรือศักย์ไฟฟ้าบนตารางภายในบริเวณที่พิจารณา และวิธีใช้ภาพร่างเส้นสนามและผิวสมศักย์โดยให้อยู่ในรูปอย่างง่ายในการวิเคราะห์แบบนี้จะให้ค่าความแม่นยำน้อยลงไปบ้างเมื่อเทียบกับวิธีที่รัดกุมยิ่งกว่า แต่ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ขณะที่รูปแบบทางกายภาพของโครงสร้างสนามยังคงเป็นไปตามเงื่อนไข

คำตอบที่ได้มีค่าความแม่นยำพอสมควรเมื่อผู้ร่างภาพมีความชำนาญสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้ถูกต้องพอสมควร (มีความผิดพลาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์) ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องทำตามกฎและขั้นตอนการคำนวณอย่างเคร่งครัด ในวิธีนี้จะใช้กับกรณีที่สนามไม่แปรไปตามทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบที่วาดเท่านั้น ขั้นตอนการพิจารณาเกี่ยวข้องกับพื้นฐานหลายประการได้แก่

1. ขอบหรือผิวของตัวนำเป็นผิวสมศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวสมศักย์ทั้งคู่
3. ทั้ง E และ D ตั้งฉากกับผิวของตัวนำจึงทำให้ขนาดของส่วนประกอบทางแนวขนานกลายเป็นศูนย์
4. เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าหรือเส้นกระแส(Streamlines) มีจุดเริ่มต้นที่ตัวประจุ โดยพุ่งออกจากประจุจุดนั้นในที่ว่าอิสระหรือสาร ไดอิเล็กทริกซ์เนื้อเดียวซึ่งไม่มีประจุนั้นจะมีจุดเริ่มต้นและพุ่งออกจากรอยต่อผิวดำนำทั้งสิ้น



ภาพที่ 2.24 ภาพวาดตัวอย่างเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า

จากนั้นจะรวบรวมเอาข้อกำหนดข้างต้นนำมาเขียนเส้นกระแสลงบนบนภาพร่างที่แสดงเป็นผิวสมศักย์ ในรูปแสดงผิวรอยต่อตัวนำสองผิวและเส้นสมศักย์ต่างๆที่มีค่าความต่างศักย์ระหว่างกันคงที่เราควรจำไว้ว่าเส้นเหล่านี้เป็นเพียงภาคตัดขวางของผิวสมศักย์เท่านั้นซึ่งเป็นรูปทรงกระบอก(แต่อาจจะไม่กลม) เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆในทิศทางตั้งฉากจากพื้นผิวภาพร่างที่วาด เมื่อสุ่มเลือกเส้นกระแสหรือเส้นฟลักซ์ที่จุด A บนผิวของตัวนำที่มีศักย์เป็นบวกมากกว่ามันจะพุ่งออกตั้งฉากกับผิวสมศักย์และต้องตัดผ่านผิวสมศักย์ระหว่างตัวนำแต่ละตัว ด้วยมุมที่เป็นจริงคงที่แสดงในรูปเส้นฟลักซ์นี้จะลากต่อไปยังอีกตัวนำหนึ่งตามกฎเพียงข้อเดียวจะได้เส้นตัดขวางกับเส้นสมศักย์เป็นรูปจตุรัสไม่ว่าจะหมุนกระดาศไปด้านไหนก็ตาม การที่จะหาค่าได้เที่ยงตรงที่สุดขึ้นอยู่กับว่าจะต้องวาดเส้นให้ได้ตัดกันตั้งฉากที่สุด ดังวิธีการเดียวกันหากจะเริ่มวาดที่จุด B ถ้าจะวาดเส้นกระแสอีกเส้นหนึ่งที่มีจุดปลายอยู่ที่ B' และแปลความหมายของเส้นกระแสทั้งสองนี้นิยามของเส้นกระแสคือเส้นที่ขนานกันไปตลอดกับความเข้มสนามไฟฟ้าหรือความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า เนื่องจากเส้นกระแสขนานกับความหนาแน่นฟลักซ์ ดังนั้นอีกความหมายหนึ่งความหนาแน่นฟลักซ์ก็ขนานกับเส้นกระแสและจะไม่มีฟลักซ์ไฟฟ้าใดตัดกับเส้นกระแสเลย ถ้ามีประจุ $5 \mu C$ บนผิวระหว่างจุด A กับ B จะปรากฏว่ามีฟลักซ์ $5 \mu C$ ในบริเวณนี้และฟลักซ์ทั้งหมดก็จะเชื่อมอยู่ระหว่าง A' กับ B' ด้วยดังนั้นเส้นกระแสคู่หนึ่งอาจจะเรียกว่าเป็นหลอดฟลักซ์ (Flux tube) เพราะว่ามีโครงสร้างทางกายภาพซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับหลอดที่นำเอาฟลักซ์พุ่งออกจากตัวนำหนึ่งไปยังอีกตัวนำหนึ่งโดยไม่มีการรั่วไหลออกไปนอกหลอดนี้เลย ต่อไปจะวาดเส้นกระแสที่สามโดยเลือกจุดเริ่มต้นที่จุด C บนผิวของตัวนำหนึ่งและจุดปลายที่จุด D บนผิวของตัวนำอีกตัวหนึ่ง การที่เส้นกระแสจะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นที่จุด C ซึ่งจะวาดได้ง่ายในความหมายทางคณิตศาสตร์ควรจะให้จำนวนฟลักซ์ในหลอด BC เท่ากับฟลักซ์ในหลอด AB ความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุดกึ่งกลางของเส้นที่เชื่อมระหว่างจุด A กับจุด B อาจหาได้จากค่าประมาณค่าโดยสมมติให้ค่าของฟลักซ์ในหลอด AB เป็น $\Delta\psi$ ซึ่งจะเขียนเป็นความสัมพันธ์ความหนาแน่นฟลักซ์ได้เป็น $\Delta\psi/\Delta L$ เมื่อหลอดนี้มีความลึกเข้าไปในเนื้อกระดาษ 1 m ส่วน ΔL คือความยาวของเส้นที่เชื่อมจาก A ไปยัง B หาขนาดของ E ได้เป็น

$$E = \frac{1}{\epsilon} \frac{\Delta\psi}{\Delta L}$$

บางครั้งอาจจะหาขนาดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้โดยหาความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับ A_1 ถ้าสมมติให้ระยะที่ว่าเป็น ΔL_N และหาค่าความต่างศักย์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นสมมติเป็น ΔV ดังนั้นจะได้

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta L_N}$$

ค่าที่หาได้นี้จะมีความเที่ยงตรงสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างจุด A กับ A_1 ในขณะที่ค่าที่หามาได้ก่อนหน้านี้นี้จะมีความเที่ยงตรงสูงสุดที่จุดกึ่งกลางระหว่างส่วนย่อยของ A ถึง B ถ้าเส้นสมมติที่วาดอยู่ใกล้กันมาก (ΔV มีค่าน้อย) และเส้นกระดาษมีระยะห่างกันน้อยด้วย ($\Delta\psi$ มีค่าน้อย) จะพบว่าความเข้มสนามไฟฟ้าจากทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\Delta\psi}{\Delta L} = \frac{\Delta V}{\Delta L_N}$$

การวาดภาพร่างที่ผ่านมาเราสมมติว่าอยู่ภายในตัวกลางของสารเนื้อเดียว (ϵ เป็นค่าคงที่) จะได้ความต่างศักย์ระหว่างผิวสมมติสองผิวใดๆเป็นค่าคงที่และจำนวนฟลักซ์ต่อหลอดฟลักซ์เป็นค่าคงที่ด้วย ($\Delta\psi$ เป็นค่าคงที่) ด้วยความสอดคล้องจากเงื่อนไขทั้งหมดนี้จะพบว่า

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_N} = \text{ค่าคงที่} = \frac{1}{\epsilon} \frac{\Delta\psi}{\Delta V}$$

ตัวแปรที่เท่ากันนี้เกิดขึ้นทุกๆจุดที่เราวาดดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เป็นค่าคงที่นั้นจะเป็นส่วนที่ประกอบขึ้นจากระยะห่างระหว่างเส้นกระดาษที่วัดจากระยะผิวสมมติกับระยะระหว่างเส้นสมมติที่วัดตามเส้นกระดาษ อัตราส่วนนี้จะต้องเป็นค่าเดียวกันที่ทุกๆจุดที่พิจารณาไม่ใช่เป็นที่ค่าความยาวระหว่างตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ระยะความยาวที่ว่าเป็นจะต้องมีค่าลดลงในบริเวณที่มีความเข้มสนามมากกว่า เนื่องจาก ΔV เป็นค่าคงที่ ค่าอัตราส่วนอย่างง่ายที่นิยมใช้คือหนึ่งและเส้นกระดาษจากจุด B ไปยัง B' ดังในรูปหากเริ่มต้นที่จุดซึ่งมี $\Delta L = \Delta L_N$ เนื่องจากอัตราส่วนของระยะเหล่านี้ถูกทำให้เป็นหนึ่งเส้นกระดาษ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเส้นสมสัณธ์หารด้วยสนามที่อยู่ในบริเวณช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส เทอมที่มีความหมายเป็นภาพร่างเชิงระนาบซึ่งแตกต่างไปจากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจริงเพราะแต่ละด้านเป็นเส้นโค้งและมีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อยแต่ก็จะมองเห็นเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้ถ้าหากทำให้มีขนาดเล็กลงผิวเหล่านี้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในระบบสามแกนซึ่งจะทำให้รูปแบบระนาบเดียวของเรากลายเป็นรูปจัตุรัสฐานโค้ง (Curvilinear squares) เมื่อทำการร่างเส้นกระแสเส้นอื่นให้ครบโดยวาดให้เป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพิ่มมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ตามรูป ความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากแผนภาพสนามที่ใช้วิธีการวาดรูปให้เป็นจัตุรัสฐานโค้งในตัวอย่างคือการเขียนผิวศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ตรงกลางรูปเหลี่ยมไว้ ทั้งเส้นกระแสและเส้นสมสัณธ์จะต้องเขียนไว้บนภาพตอนเริ่มต้นซึ่งวาดไว้เฉพาะรอยต่อของผิวดำนำเท่านั้น มีคำตอบเดียวที่เป็นไปได้ซึ่งอาจจะพิสูจน์ได้ในเวลาต่อมาด้วยทฤษฎีความเป็นหนึ่งเดียว (uniqueness theorem) สำหรับสมการลาปลาซและกฎเริ่มต้นเมื่อเริ่มเขียนเส้นกระแสขึ้นมาเส้นหนึ่งก็จะมีเส้นสมสัณธ์ลากอยู่ข้างในเมื่อลากเส้นกระแสอื่นเพิ่มเข้าไปก็จะประกอบกันเข้าเป็นรูปจัตุรัสฐานโค้งอย่างสมบูรณ์ซึ่งอาจจะพบว่าไม่สามารถทำจัตุรัสได้อย่างถูกต้องบริเวณมุมความผิดพลาดจากการวาดจะถูกแก้ไขต่อไป



ภาพที่ 2.25 ภาพวาดเส้นกระแสที่วาดให้ตั้งฉากกับตัวนำและประกอบเข้าเป็นจัตุรัสฐานโค้ง

2.2.23 การแพร่กระจายในตัวนำ: ปรากฏการณ์ความลึกผิว

(Propagation in good conductor : Skin effect)

ในการแพร่กระจายคลื่นแบบมีความสูญเสีย พฤติกรรมของตัวนำที่ดี (Good conductor) เมื่อมีคลื่นระนาบสม่ำเสมอเคลื่อนที่อยู่ในตัวมัน สารที่มีการสูญเสียสูงคือมีแทนเจนต์การสูญเสียที่ $\epsilon''/\epsilon' \gg 1$ เมื่อเอาเกณฑ์การตัดสินนี้มาใช้กับตัวนำที่ดีจะทำให้ได้เกณฑ์การตัดสินเพิ่มเข้ามาคือ $\sigma/\omega\epsilon' \gg 1$ เช่นเดียวกันกับที่ได้พิจารณาการลดทอนที่เกิดขึ้นกับคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวนำที่ดี การประมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแบบใหม่ในการ สำหรับการลดทอน ค่าอิมพีแดนซ์ภายในเนื้อสาร ซึ่งเป็นการปรับปรุงมาจากการวิเคราะห์ในตัวนำที่ดี คลื่นที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในไดอิเล็กตริกซึ่งแนวคิดกับที่ ตัวตัวนำนั้น ในกรณีนี้คลื่นจะมีการแพร่กระจายไปตามผิว ส่วนสนามที่ปรากฏอยู่ภายในตัวนำนั้นจะ สูญเสียไปกับการลดทอนที่กระจายออกไปในรูปของการก่อตัวเป็นสร้างเป็นค่าความนำขึ้นมา สนามทั้งหมดนั้นจะถูกลดทอนเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เดินทางไปตามระยะทางที่เดินทางไปตามผิว ซึ่งตัวอย่าง ที่เห็นได้คือกลไกการสูญเสียทางความต้านทานของสายส่ง ซึ่งทำให้เกิดเป็นพารามิเตอร์ความต้านทาน R ขึ้นมา จากการพิจารณาว่าตัวนำที่ดีควรมีค่าความนำสูง และนำกระแสได้มาก พลังงานที่เกิดขึ้นในการเดินทางของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านสารที่มีความไม่ต่อเนื่องโดยการแพร่กระจายของคลื่นนั้นมิผลทำให้เกิด การสูญเสียทางด้านความต้านทาน หากพิจารณาค่าแทนเจนต์การสูญเสีย จะเห็นว่าอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสหน้าต่อกระแสกระจัดต่อสารตัวนำนั้นกำหนดโดย $\sigma/\omega\epsilon'$ และสมการทั่วไปของค่าคงที่ ในการแพร่กระจายคือ

2.3 หลักการวัดค่าทางไฟฟ้าและส่วนประมวลผล

2.3.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ แบบอาศัยการคายประจุของตัวเก็บประจุ(RC Time constant)

การต่อวงจรตัวเก็บประจุนุกรมกับตัวต้านทานจะทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุผ่านตัวต้านทานเมื่อสับ สวิตช์จากค่าเวลาที่วัดได้จะเป็นไปตามสมการ

การประจุนำไฟฟ้าผ่านตัวต้านทาน R ไปยังตัวเก็บประจุ C จะเกิดขึ้นเมื่อสับสวิตช์ประจุไฟฟ้าจะมี ค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่สูงสุดอยู่ที่ค่าหนึ่งและหากให้ประจุไฟฟ้ามีค่า q ที่เวลาหนึ่ง (transient charge) เมื่อสับสวิตช์ไปอีกทางหนึ่งตัวเก็บประจุจะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านตัวต้านทาน ค่ากระแสจะหาได้จาก dq/dt จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ กระแสได้เป็น

$$E = V_c + iR$$

$$E = \frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{E - q/C}{R} = \frac{(CE - q)}{RC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dq}{(CE - q)} = \frac{dt}{RC}$$

ที่เวลา $t=0$, $q=0$ เมื่อเวลาผ่านไป ที่ t ใดๆ ประจุที่ตัวเก็บประจุ C มีค่าเท่ากับ q จะพบว่า

$$\int_0^q \frac{dq}{(CE - q)} = \int_0^t \frac{dt}{RC}$$

$$\int_0^q \frac{d(CE - q)}{CE - q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

$$\int_{CE}^{CE-q} \frac{du}{u} = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln(CE - q) - \ln(CE) = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln \left[\frac{CE - q}{CE} \right] = -\frac{t}{RC}$$

$$CE - q = CE e^{-t/RC}$$

$$q = CE(1 - e^{-t/RC})$$

$$V_c = E(1 - e^{-t/RC})$$

จากสมการพบว่า RC มีเทอมในส่วนของเวลา ค่า RC จะมีค่าคงที่สำหรับวงจรไฟฟ้าในแต่ละวงจรซึ่งจะเขียนค่า RC ด้วย T ซึ่งเป็นค่า time constant เมื่อ $t=RC$ จะได้สมการ

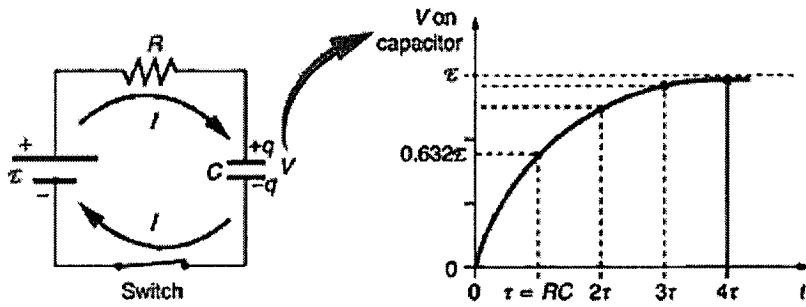
$$V_c = E(1 - e^{-1})$$

$$V_c = \frac{E(e-1)}{e}$$

$$V_c = 0.632E$$

เมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวต้านทาน R มาออกันอยู่ในตัวเก็บประจุเป็นเวลา $t = RC$ จะมีตัวเก็บประจุสะสมอยู่จะพบว่าความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเป็น $0.632E$ จากรูปจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของ V_c ที่เวลาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.26 การคายประจุของตัวเก็บประจุ

ขณะที่ตัวเก็บประจุมีประจุอยู่เต็มที่จะได้ค่าความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ $V_c = E$ เมื่อเกิดการคายประจุผ่านจากตัวเก็บประจุผ่าน ตัวต้านทาน R จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า $i = dq/dt$ และมีค่าความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ $q/C = V_c$ จะได้ความสัมพันธ์

$$V_c + iR = 0$$

$$\frac{q}{C} = -R \frac{dq}{dt}$$

$$\frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}$$

ที่เวลาเริ่มต้น $t=0$ ประจุภายในตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ Q เมื่อเวลาผ่านไป t ประจุที่สะสมที่ตัวเก็บประจุจะมีค่าเป็น q จากคำตอบของสมการจะหาค่าได้เช่นเดียวกันกับสมการข้างต้นจะได้สมการเป็น

$$q = Q.e^{-t/RC}$$

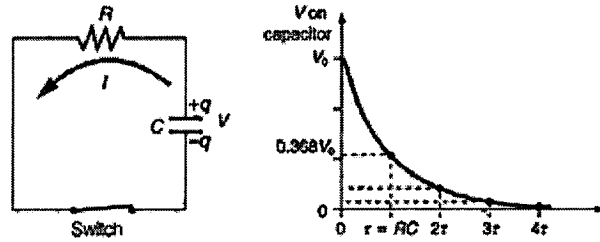
หารสมการด้วย C ทั้งสองข้างของสมการ

$$V_c = E.e^{-t/RC}$$

ที่ $t = RC = T$ จะได้

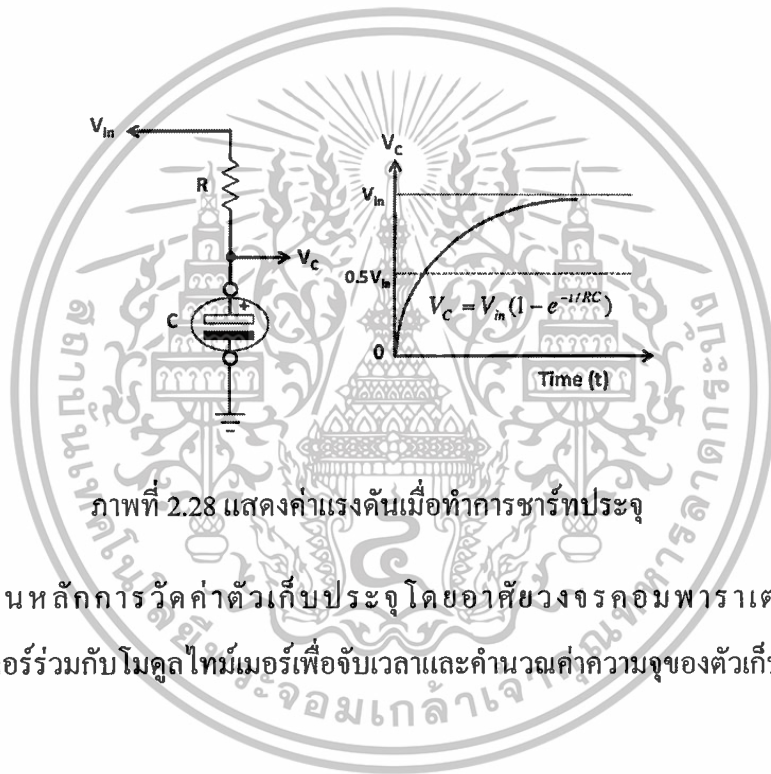
$$V_c = 0.368E$$

จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูป



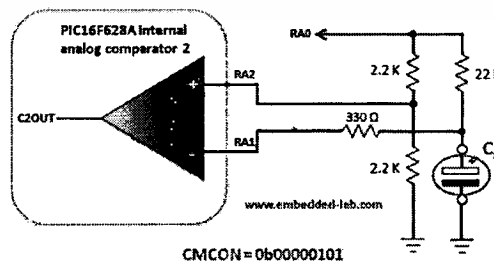
ภาพที่ 2.27 แสดงการคายประจุเมื่อสับสวิตช์

จากการเปลี่ยนแปลงของค่าประจุภายในตัวเก็บประจุข้างต้นสามารถนำมาออกแบบวงจรสำหรับวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุได้



ภาพที่ 2.28 แสดงค่าแรงดันเมื่อทำการชาร์จประจุ

วงจรด้านล่างเป็นหลักการวัดค่าตัวเก็บประจุโดยอาศัยวงจรคอมพาราเตอร์ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโมดูลไทม์เมอร์เพื่อจับเวลาและคำนวณค่าความจุของตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 2.29 แสดงการต่อวงจรคอมพาราเตอร์ในขาไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยอาศัยการวัดค่าไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับวงจรรีดจังก์

ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้แรงดัน ac นั้นอาศัยวงจรวัดค่าแบบบริดจ์ร่วมกับการวัดค่าโดยกระบวนการจะใช้การจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเข้าไปยังตัวเก็บประจุซึ่งในที่นี้อาจจะเป็น โครงสร้างแบบอื่นที่มีลักษณะของตัวเก็บประจุโดยการต่อขา

2.3.2 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และการสั่งงาน

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์อีกเบอร์หนึ่งของตระกูล PIC (Peripheral Interface Controller) ในปัจจุบันซึ่งมีศักยภาพในการทำงานสูงและในคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้คือประกอบไปด้วยความสามารถหรือฟังก์ชันในการใช้งานต่างๆ ไว้ในตัวเอง เช่น มีโมดูล (Module) แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog To Digital Converter)

USART, SPI, I²C, PWM อื่นๆ มีโมดูลที่เพิ่มเติมขึ้นมาใหม่คือ Can Module, ECCP ซึ่งเป็นคุณสมบัติใหม่ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC โดยมีในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 และเบอร์อื่นๆของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC 18FXXX และยังเหมาะสมต่อการใช้งานตรงที่หน่วยความจำโปรแกรมเป็นหน่วยความจำแบบแฟลช (Flash Program Memory) ซึ่งสามารถเขียนและลบข้อมูลได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้าได้นับหลายพันครั้ง ข้อเด่นอีกประการหนึ่งของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้ในเรื่องความเร็ว PIC18F458 สามารถทำงานได้ที่ความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงถึง 40 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) มีวงจร PLL (Phase Lock Loop) ซึ่งเป็นวงจรความถี่สัญญาณนาฬิกาที่สามารถเลือกโดยการโปรแกรมซอฟต์แวร์ ซึ่งสามารถคูณค่าความถี่ที่รับเข้ามาได้ถึง 4 เท่าของสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกทั้งยังทำงานในลักษณะของไปป์ไลน์ (Pipe Line) ทำให้มีความเร็วในการทำงานมากกว่าซีพียูทั่วไปที่มีค่าความถี่เดียวกัน โดยลักษณะการทำงานจะใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 1 หรือ 2 ไซเคิล (Cycle) ต่อคำสั่งเท่านั้น และหน่วยความจำไม่ถูกแบ่งเป็นเพจ (Page) อีกต่อไปในการเขียนโปรแกรมจึงง่ายโดยไม่ต้องเลือกแบงก์ (Bank)

คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

สามารถสรุปคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

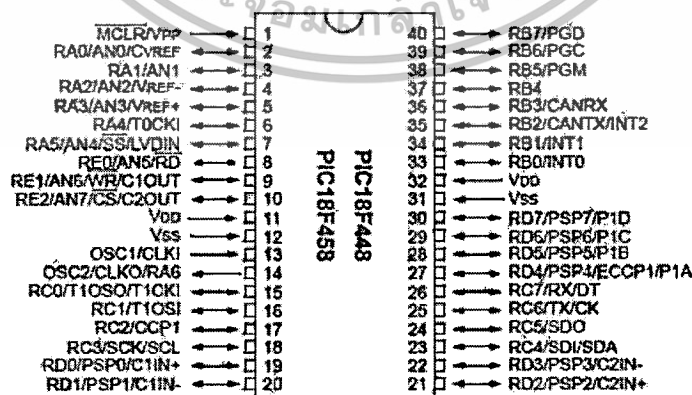
มีชุดคำสั่ง 75 คำสั่ง

1. ซีพียูเป็นแบบ RISC (Reduce Instruction Set Computer)
2. เป็นซีพียู 16 บิต
3. หน่วยความจำ SRAM 1536 ไบต์ (Byte)
4. หน่วยความจำโปรแกรม 32 กิโลไบต์ (Kbyte)
5. หน่วยความจำอีอีพรอม 256 ไบต์
6. รับความถี่สัญญาณนาฬิกาตั้งแต่ไฟตรงถึง 40 เมกะเฮิรตซ์
7. มีวงจร PLL (Phase Lock Loop) ซึ่งคูณค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกา 4 เท่าของสัญญาณอินพุต
8. ตอบสนองการอินเตอร์รัพต์ (interrupt) ได้ถึง 21 แห่ง
9. มีขารับสัญญาณอินเตอร์รัพต์จากภายนอก 3 ขา คือ RB0/INT0, RB1/INT1, RB2/INT2
10. เลือกลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัพต์จากอุปกรณ์ต่อพ่วงได้
11. กระแสซิงค์ (Synchronous) และซอร์ส (Source) ของพอร์ต (Port) สูงสุด 25 มิลลิแอมป์
12. มีโมดูลไทเมอร์ 4 ตัวดังนี้
 - 12.1 ไทเมอร์ 0 ขนาด 8/16 บิต เป็นไทเมอร์ / เคาท์เตอร์พร้อมปริสเกลเลอร์ 8 บิต
 - 12.2 ไทเมอร์ 1 ขนาด 16 บิต เป็นไทเมอร์ / เคาท์เตอร์พร้อมปริสเกลเลอร์ 8 บิต
 - 12.3 ไทเมอร์ 2 ขนาด 8 บิต มีปริสเกลเลอร์ โพสต์สเกลเลอร์ และรีจิสเตอร์คาบเวลา (Period Register) เป็นตัวเปรียบเทียบค่ากับไทเมอร์ 2 อยู่ภายในตัว
 - 12.4 ไทเมอร์ 3 ขนาด 16 บิต เป็นไทเมอร์ / เคาท์เตอร์
13. มีโมดูล CCP (Capture/Compare/PWM) 1 ชุด ส่วนตรวจับสัญญาณ (Capture) ขนาด 16 บิต ความละเอียดสูงสุด 6.25 นาโนวินาที ส่วนเปรียบเทียบสัญญาณ (Compare) ความละเอียดสูงสุด 100 นาโนวินาที และส่วนมอดูเลชั่นทางความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM) ความละเอียดสูงสุดที่ 10 บิต
14. มีโมดูล ECCP (Enhanced Capture/Compare/PWM) 1 ชุด ทำงานคล้ายกับโมดูล CCP แต่จะต่างกันตรงที่จะใช้งานในการควบคุมมอเตอร์
15. มีโมดูล MSSP (Master Synchronous Serial Port) ใช้งานเป็นวงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทำงานได้ 2 โหมด คือ SPI และ I²C
16. มีโมดูลสื่อสารอนุกรม USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. มีโมดูลแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล (Analog To Digital Converter) อยู่ภายในความละเอียด 8 บิต 8 ช่อง
18. มีโมดูลเปรียบเทียบแรงดันแอนาลอก (Comparator Voltage Referent Module) ภายใน
19. สามารถเลือกโหมดการป้องกันข้อมูลได้ (Code Protection)
20. ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2.0V ถึง 5.0V
21. สามารถโปรแกรมด้วยแรงดันไฟต่ำได้ LVP (Low Voltage Programming)
22. ฟังก์ชันการทำงานโปรแกรมเป็นแบบ ICSP (In Circuit Serial Programming)
23. มีเพาเวอร์ออนรีเซต (Power On Reset : POR) เพาเวอร์อัปไทมเมอร์ (Power Up Timer : PWRT) และ ออสซิลเลเตอร์สตาร์ทอัปไทมเมอร์ (Oscillator Start Up Timer : OST)
24. มีวอตช์ด็อกไทมเมอร์ (Watch Dog Timer : WDT) ทำให้มีความเชื่อมั่นในการทำงานสูง
25. มีโหมดการประหยัดพลังงาน (Sleep Mode)
26. มีฟังก์ชันตรวจสอบแรงดันไฟเลี้ยง (Brown Out Reset : BOR)
27. มีสแต็ก (Stack) 31 ระดับ มีพอร์ตอินพุตเอาต์พุต 5 พอร์ต คือ A,B,C,D และ E รวมแล้วพอร์ตการใช้งานทั้งหมด 34 บิต โดยพอร์ต A มีจำนวน 7 บิต RA0-RA6 พอร์ต B มี 8 บิต คือ RB0-RB7 พอร์ต C และ D มีจำนวน 8 บิต คือ RC0-RC7 และ RD0-RD7 พอร์ต E มีจำนวน 3 บิต คือ RE0-RE2

PIC18F458 มีขาทั้งหมด 40 ขาในตัวถังแบบ PDIP และ 44 ขาในตัวถังแบบ TQFP ซึ่งแต่ละขาจะมีหน้าที่การใช้แตกต่างกันออกไปและมีขนาดขาอินพุตและเอาต์พุตทั้งหมด 34 ขา ซึ่งทั้ง 34 ขา สามารถเลือกใช้งานเป็นอินพุตได้หมด ดังรูป แสดงการจัดขาตัวถังแบบ PDIP



ภาพที่ 2.30 แสดงโครงสร้างการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาสถาปัตยกรรมมาจากเบอร์อื่นๆ ของตระกูล PIC เช่น PIC16F877 ซึ่งถือว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกันกับ PIC18F458 แต่จะต่างกันตรงมีฟังก์ชันและโมดูลต่างๆที่เพิ่มเติมเข้ามาและที่เห็นได้ชัดคือ PIC18F458 นั้นเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต ที่มีชุดคำสั่งทั้งหมด 75 คำสั่ง ซึ่งยังไม่รวมคำสั่งไคเร็กทีฟที่มากับโปรแกรม MPLAB ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard Architecture) โดยมีลักษณะของสถาปัตยกรรมแบบนี้จะเป็นการแยกหน่วยความจำข้อมูลออกจากกันทำให้การทำงานได้เร็วขึ้นและนอกจากการจัดสถาปัตยกรรมแบบนี้จะเป็นการแยกหน่วยความจำข้อมูลออกจากกันทำงานได้เร็วขึ้นและนอกจากการจัดสถาปัตยกรรมแบบนี้แล้วในตระกูลไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ยังมีลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งคือมีการทำงานเป็นแบบเปปไลน์ (Pipe Line) ซึ่งมีลักษณะการทำงานคือสามารถเฟตช (Fetch) คำสั่งถัดไปได้ในขณะที่กำลังเอ็กซีคิวต์ (Execute) อยู่ทำให้การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 มีการทำงานที่เร็วขึ้นโครงสร้างจะมีบางส่วนที่คล้ายคลึงกับ PIC16F887 สิ่งที่เพิ่มเติมขึ้นมาอีกหนึ่งตัวมีขนาด 16 บิต คือไทเมอร์ 3 รวมแล้วเป็นจำนวน 4 ตัวและหน่วยความจำก็ได้เพิ่มขนาดขึ้นด้วย PIC 16F877 มีหน่วยความจำโปรแกรมเพียง 8 กิโลไบต์ หน่วยความจำข้อมูล 368 กิโลไบต์ ส่วน PIC18F458 มีมาถึง 32 กิโลไบต์และมีหน่วยความจำข้อมูล 1536 ไบต์ สำหรับหน่วยความจำอีพรอมยังคงเท่าเดิมคือ 256 กิโลไบต์สถาปัตยกรรมและการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC โดยรวมแล้วจะมีส่วนการทำงานพื้นฐานที่เหมือนกัน

การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มจากการป้อนไฟเลี้ยงและป้อนสัญญาณนาฬิกาให้แก่ตัวมันจากนั้นซีพียูจะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรม เพื่อที่จะอ่านข้อมูลคำสั่งแล้วทำงานตามคำสั่งที่บรรจุอยู่ในหน่วยความจำโปรแกรม เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานตามคำสั่งที่กำหนดในข้อมูลของชุดคำสั่งจะถูกนำไปเก็บไว้ในรีจิสเตอร์คำสั่ง (Instruction Register) จากนั้นจะถูกส่งไปยังวงจรถอดรหัสเพื่อทำการควบคุมไทเมอร์ทั้งหมดภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานตามคำสั่ง (Instruction Register) จากนั้นจะถูกส่งไปควบคุมหน่วยคำนวณคณิตศาสตร์ (Arithmetic Logic Unit : ALU) โดยผ่านทางด้านวงจรมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) ด้วยการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 เป็นหน้าที่ของส่วนกำเนิดจังหวะการทำงาน (Timing Generation) ซึ่งจะทำงานสัมพันธ์กับไทเมอร์ 3 ตัว ออสซิลเลเตอร์สตาร์ทอัพไทเมอร์ วอตช์ด็อกไทเมอร์ และเพาเวอร์อัพไทเมอร์

การเขียนโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานนั้นจะมีรูปแบบและเงื่อนไขในการเขียนโปรแกรมเฉพาะ โดยรูปแบบและเงื่อนไขนั้นคือภาษาที่ใช้เขียน โปรแกรมทำงานซึ่งในปัจจุบันก็มีให้เลือกใช้หลากหลายภาษาแล้วแต่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานนั้นจะมีรูปแบบและเงื่อนไขในการเขียนโปรแกรมเฉพาะ โดยรูปแบบและเงื่อนไขนั้นคือภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมการทำงานซึ่งในปัจจุบันก็มีให้เลือกใช้หลากหลายภาษาแล้วแต่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน

2.3.3 ภาษาของการเขียนโปรแกรม

1. ภาษาเครื่อง

ภาษาเครื่องหรือแมชชีนโค้ด (Machine Code) เป็นภาษาของรากฐานการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นรหัสเลขฐาน 2 ที่บรรจุอยู่ในพื้นที่ข้อมูลภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นรหัสที่ส่วนประมวลผลจะแปลงเป็นขั้นตอนการทำงาน ซึ่งหากเราจะทำความเข้าใจถึงโครงสร้างภายใน และข้อมูลชุดคำสั่งจากโรงงานผลิตด้วย แต่โชคดีที่เรามีเครื่องมือที่ทำให้เราแปลงจากภาษาเครื่องได้นั้นคือ ภาษาแอสเซมบลีซึ่งเราจะอธิบายถัดไป

2. ภาษาแอสเซมบลี

ภาษาแอสเซมบลี (Assembly language) เป็นภาษาที่มีระดับสูงกว่าภาษาเครื่องโดยเราจะใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหลีกเลี่ยงการเขียนรหัสภาษาเครื่อง หมายความว่าในการเขียนโปรแกรมเราจะมีคำสั่งที่คล้ายกับภาษาของมนุษย์ในการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำงานตามขั้นตอน ซึ่งตัวโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีจะทำหน้าที่แปลงภาษาที่มนุษย์เขียนภาษาเครื่องทำให้มีความสะดวกมากขึ้น

3. ภาษาเบสิก

ภาษาเบสิก (basic language) เป็นภาษาระดับสูงกว่าภาษาแอสเซมบลี เนื่องจากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลีนั้นผู้เขียนจำเป็นต้องมีความรู้การทำงานภายในของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่บ้างทำให้ผู้จะพัฒนาโปรแกรมต้องมาศึกษาการทำงานภายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนซึ่งต้องอาศัยเวลา และพื้นฐานความรู้ ดังนั้นภาษาเบสิกจึงเป็นทางเลือกเพื่ออำนวยความสะดวกในการเขียนโปรแกรมเพราะเป็นภาษาที่ง่ายมากเหมาะกับผู้ที่จะเริ่มก่อกันแต่ข้อด้อยสำหรับภาษาเบสิกคือความเร็วในการทำงานของโปรแกรมค่อนข้างช้าและไม่ยืดหยุ่นในการทำงาน ทำให้ในปัจจุบันไม่นิยมนำภาษาเบสิกมาเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

4. ภาษาซี

ภาษาซี (C language) เป็นภาษาระดับสูงคล้ายกับภาษาเบสิกแต่ภาษาซีจะเป็นภาษาที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการเขียนโปรแกรมมากกว่าภาษาเบสิก อีกทั้งเราสามารถใช้ภาษาซีในการเข้าใจโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์เร็วกว่าภาษาเบสิก แต่ผู้เขียนโปรแกรมจำเป็นต้องมีความรู้และมีประสบการณ์ในการเขียนโปรแกรมแบบโครงสร้าง

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงแค่ตัวอย่างของภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมอย่างแพร่หลาย ซึ่งในปัจจุบันก็มีอีกหลายภาษาที่ถูกคิดค้นขึ้นมา หากเรามีความสนใจก็สามารถศึกษาหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ ซึ่งในอนาคตก็คงจะมีการพัฒนาภาษาโปรแกรมให้มีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้น

2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การพัฒนาโทรมาตรตรวจวัดความชื้นในดินแบบอัตโนมัติ (Development of Automatic Soil Moisture Telemetry) วิษญู ศรีวงษา การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 6

2. การพัฒนาเครื่องวัดความชื้นในดินทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อจัดการดินและน้ำชลประทานในดินทรายอย่างมีประสิทธิภาพ (Development of Soil Moisture Meter for Improvement of Soil and Irrigation Water Management in Sandy Soil)

สมบูรณ์ มั่นความดี , พงษ์จิตต์ ศรีสุข , สุภัทตรา นุชนารถ

กลุ่มงานดินด้านวิทยาศาสตร์ กลุ่มวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนากรมชลประทาน

3. การพัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อการเกษตร (Development of Instrument to Measure Soil Moisture by Evaluating Electrical Resistance for Agricultural Purpose)

ศักดิ์ชัย เล้าภากรณ์ วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการวัดความชื้นของเนื้อลำไย โดยใช้วงจรสร้างสัญญาณพิก้า
(Development of a Device for Moisture Measurement of Longan Flesh Using Clock Generator)
กฤษณะ มงคลเกิด สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. โรงเพาะเห็ดฟางควบคุมความชื้นและอุณหภูมิด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ชัยสิทธิ์ ระดับ 1 , ฉวีวรรณ
สิงห์โหนด 2 , ศักดิ์ศรี แก่นสม 3 , จักรตรา โขมะสรานนท์ สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

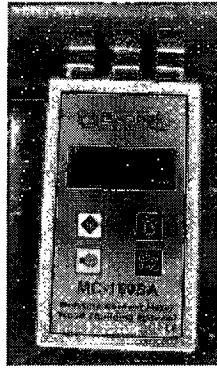
3.1 การออกแบบส่วนประกอบเครื่องวัดค่าความชื้นของไม้

การออกแบบสร้างเครื่องวัดความชื้นไม้โดยซึ่งต้องการวัดค่าความชื้นไม้โดยไม่ทำลายพื้นผิวและเนื้อไม้ ของตัวอย่าง อาศัยกระบวนการวัดค่าความชื้นทางอ้อมโดยอาศัยการวัดค่าไดอิเล็กตริกของตัวอย่างไม้ซึ่งจะใช้วิธีการส่งสนามไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเข้ายังเนื้อไม้ และแปรค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความชื้นภายในไม้ และใช้วงจรเรียงกระแสให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะเชื่อมต่อกับวงจร แปลงสัญญาณ ADC เพื่อนำไปประมวลผลโดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผลมีส่วนชดเชยอุณหภูมิเพื่อคำนวณค่าความชื้น ไม้ และใช้วิธีการเก็บข้อมูลของค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ของไม้แต่ละชนิดเพื่อกำหนดโหมดการวัด ร่วมกับการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณค่าความชื้นให้ถูกต้อง ตัวเครื่องที่ออกแบบมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญดังนี้

1. Probe หรือ หัววัดที่เป็นโลหะ
2. ตัวแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC)
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit, MCU)
4. หัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor)
5. ส่วนแสดงผลชนิด แอลซีดี (Liquid crystal display)
6. ปุ่มกดเลือกโหมดการวัดค่าและชนิดของไม้

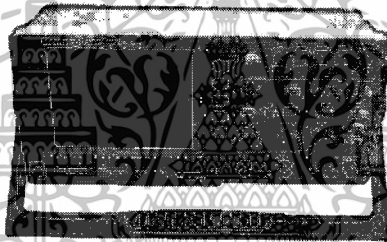
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบตัวเครื่องวัดความชื้นไม้

3.2.1 เครื่องวัดความชื้น ไม้แบบอาศัยการวัดค่าไดอิเล็กตริก สำหรับวัดค่าความชื้นเพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความชื้น ไม้ที่สร้างขึ้น



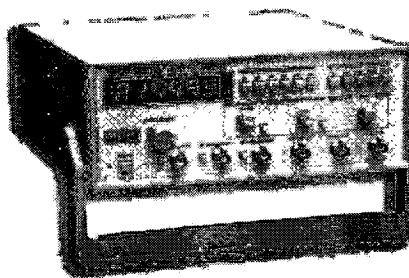
ภาพที่ 3.1 เครื่องวัดความถี่แบบใช้การวัดค่าไดอิเล็กตริก

3.2.2 ดิจิตอลอสซิลโลสโคปสำหรับวิเคราะห์สัญญาณทั้งที่เป็นความถี่และคาบเวลา รวมถึงค่าความต่างศักย์ที่ได้จากวงจรวัดค่าเพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงการออกแบบวงจร



ภาพที่ 3.2 ดิจิตอลอสซิลโลสโคป

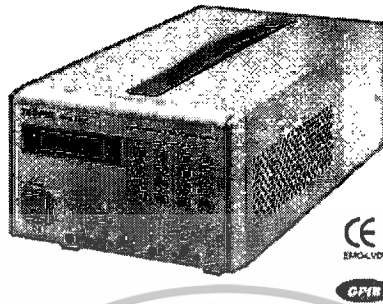
3.2.3 ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ เครื่องมือสำหรับสร้างสัญญาณไฟฟ้ารูปแบบตามที่ต้องการเพื่อป้อนให้กับวงจรขณะทำการทดสอบการทำงานของวงจร ซึ่งสามารถปรับค่าความถี่ ค่าความถี่ไซน์เคิล รวมถึงแอมพลิจูดของสัญญาณได้ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกในการทดลอง



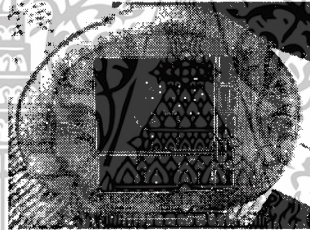
ภาพที่ 3.3 ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้แก่วงจรที่ใช้ทดลองเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ซึ่งตัวเครื่องต้องสามารถปรับได้ทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า

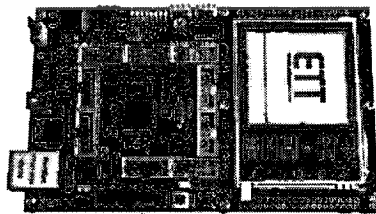


ภาพที่ 3.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดความชื้นในอากาศ

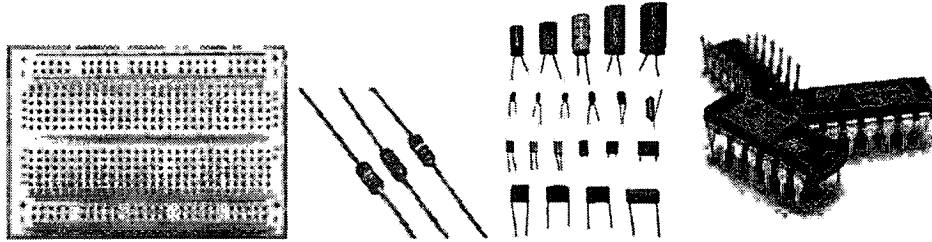
3.3.5 ฮาร์ดแวร์สำหรับออกแบบระบบ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการประมวลผลที่เร็วและมีหน่วยความจำโปรแกรมขนาดใหญ่สำหรับการพัฒนาโปรแกรมเพื่อประมวลผล



ภาพที่ 3.6 บอร์ดเรียนรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 อุปกรณ์ทดลองอื่นๆที่จำเป็น ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ ไอซี ลอจิกโพรบ มัลติมิเตอร์ ลอจิกอนาไลเซอร์ ซึ่งใช้สำหรับเป็นส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และวัดค่าสัญญาณจากวงจรทดลอง



ภาพที่ 3.7 ชุดแผงวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 3.8 ลอจิกโพรบสำหรับวัดค่าลอจิกของสัญญาณ

3.3.7 คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับเขียน โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และแปลง code โปรแกรมให้เป็น hex code สำหรับโหลดเข้าสู่หน่วยความจำโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ เลือกใช้คอมพิวเตอร์ของ KEIL uVision4 ซึ่งง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรม



ภาพที่ 3.9 คอมพิวเตอร์และชุดซอฟต์แวร์สำหรับพัฒนาโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.2 ออกแบบวงจรทดลองสำหรับสร้างเครื่องมือวัดความชื้นไม้ ซึ่งได้แก่

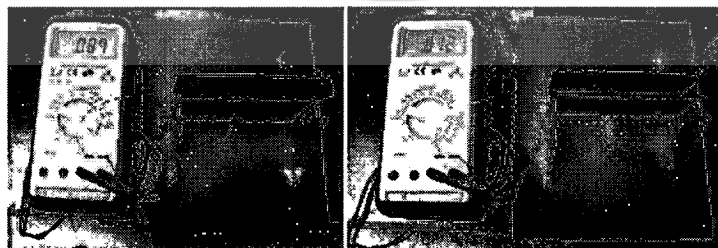
- วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย สำหรับเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรกำเนิดความถี่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ หน้าจอแสดงผล สำหรับวงจรเพาเวอร์ซัพพลายนี้ออกแบบให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยและง่ายต่อการออกแบบจึงเลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปในการเปลี่ยนแรงดันจากแบตเตอรี่ 9 โวลต์ ให้เป็นแรงดัน 3.3 โวลต์

- วงจรกำเนิดความถี่ ใช้ฮอปแอมป์ในการออกแบบ โดยสร้างสัญญาณความถี่ต่ำและความถี่สูง เพื่อส่งไปยังวงจรมอดูเลตสัญญาณ

- วงจรมอดูเลต ออกแบบโดยใช้ฮอปแอมป์ในการมอดูเลตสัญญาณความถี่สูงและความถี่ต่ำ เข้าด้วยกัน โดยขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ต่ำจะสูงกว่าแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่สูงและจะส่งผ่านไปยังโพรบเพื่อส่งสนามไฟฟ้าเข้าไปยังเนื้อไม้

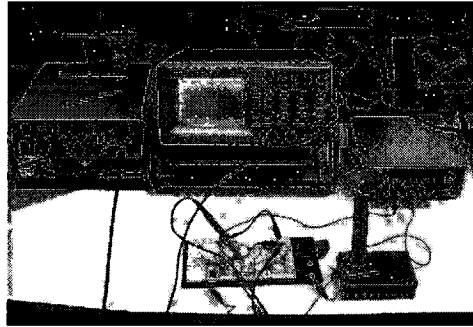
- วงจรกรองสัญญาณ ออกแบบโดยใช้ฮอปแอมป์ซึ่งทำหน้าที่กรองความถี่ของสัญญาณรบกวน ออกจากสัญญาณที่วัดได้จากโพรบวัด

ออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์และวงจรสำหรับวัดค่าโดยใช้วงจรวัดค่าแบบ ac bridge เบื้องต้นผู้วิจัย ได้ทดลองอย่างง่ายโดยใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าความจุไฟฟ้าเมื่อตัวกลางคือ ไม้และอากาศตามลำดับจากนั้นทดลองส่งสนามไฟฟ้าลงไปบนเนื้อไม้ที่มีค่าความชื้นต่างกันและวัดค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคป



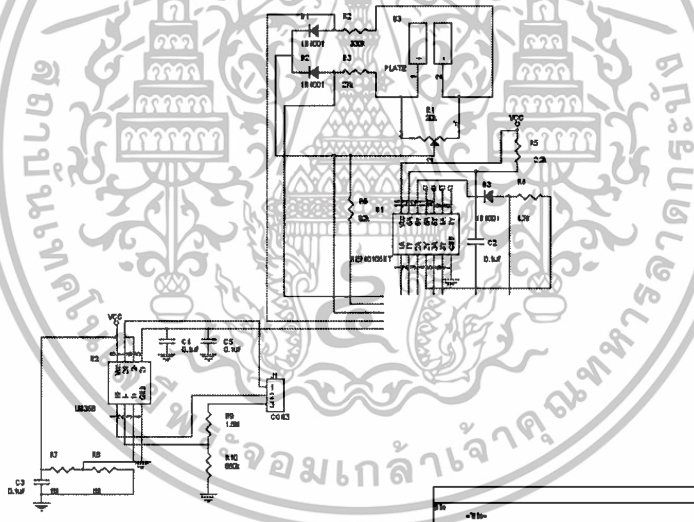
ภาพที่ 3.10 การวัดค่าความจุไฟฟ้าจากแผ่นตัวนำแบบขนาน โดยมีตัวกลางที่เป็น ไม้และอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 การจัดชุดอุปกรณ์วัดค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งไปยังเนื้อไม้

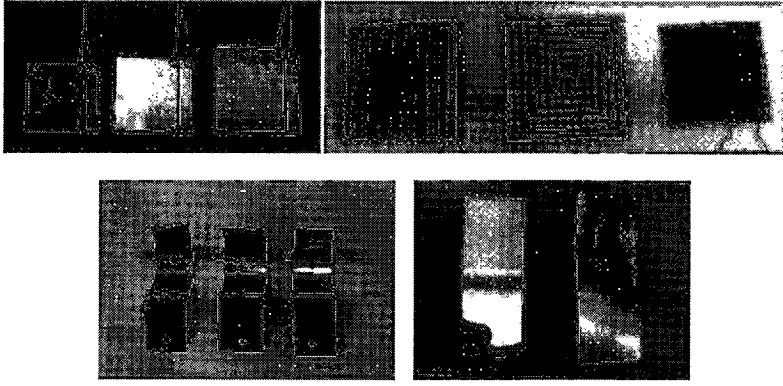
3.3.3 การวัดค่าความชื้นโดยอาศัย การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของไม้ โดยต่อวงจรวัดค่าบนแผงวงจรทดลองที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดความถี่แล้ววัดค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเมื่อเปลี่ยนค่าความชื้นของไม้โดยการวัดค่าแอมพลิจูดและค่าความถี่ของสัญญาณที่ได้



ภาพที่ 3.12 วงจรภาคเซนเซอร์แบบที่ 1

จากวงจรด้านบนบนแผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นโพรบสำหรับวัดค่าโดยทำการทดลองกับโพรบที่มีลักษณะแตกต่างกันทั้งรูปทรงของโพรบ วัสดุที่ใช้ ซึ่งได้แก่ แผ่นทองแดง อลูมิเนียมและสแตนเลส ซึ่งจะกดให้เนบติดกับผิวหน้าของแผ่น ไม้ที่จะวัดค่า ซึ่งผู้วิจัยได้ทดสอบกับไม้ชนิดเดียวกันที่มีค่าความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งวงจรสามารถให้ค่าความต่างศักย์ที่ฝั่งขาออก (คอนเนคเตอร์ 3) แปรตามค่าความชื้นของไม้ที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

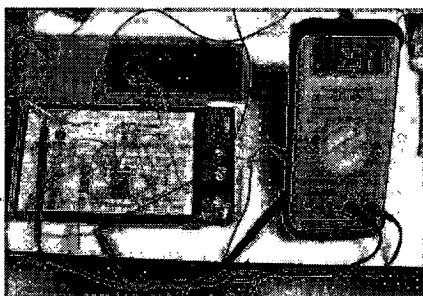


ภาพที่ 3.13 แผ่นเพลทเซนเซอร์ แบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้ง



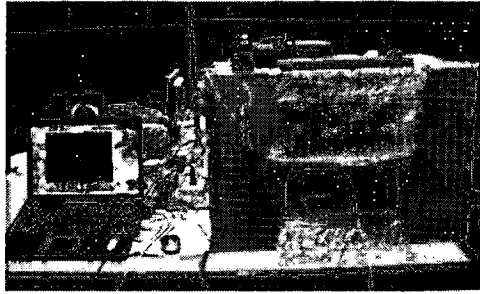
ภาพที่ 3.14 การเตรียมแผ่นสแตนเลสเพื่อสร้างหัวโพรบิวัด

ภาพที่ 3.15 ตัวอย่างไม้เต็งรังที่ใช้วัดค่าซึ่งมีความชื้นต่างกัน

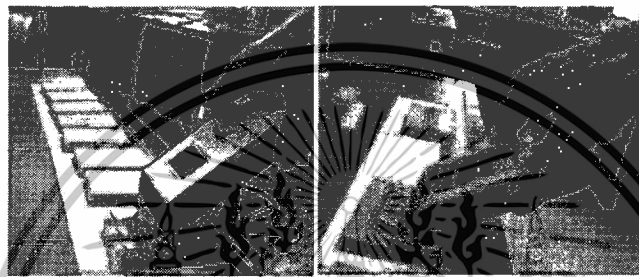


ภาพที่ 3.16 การต่อวงจรเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์

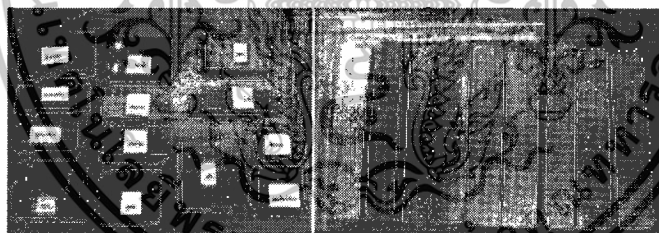
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.25 การจัดชุดทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของ อากาศไม่แห้ง และไม้ที่มีความชื้นต่างกัน



ภาพที่ 3.26 การวัดความชื้นของไม้ตัวอย่าง



ภาพที่ 3.27 ไม้ตัวอย่างที่นำมาวัดค่าความชื้น

3.6 การออกแบบโปรแกรมและฟังก์ชันการวัดของตัวเครื่อง

ออกแบบการแสดงผลและกำหนดจำนวนปุ่มกดเพื่อควบคุมการทำงานของตัวเครื่อง โดยการทำงานของตัวเครื่องประกอบด้วยปุ่มกดจำนวน 3 อัน ได้แก่ ปุ่มเปิดปิดเครื่อง ปุ่มเลือกฟังก์ชันการวัดของไม้แต่ละชนิดและปุ่มเลือกรูปแบบการวัด ในการออกแบบฟังก์ชันการวัดทำได้โดยการสร้างไคอะแกรมการทำงานตามที่ต้องการ จากนั้นจะเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อกำหนดลำดับและฟังก์ชันการทำงานของตัวเครื่องตามไคอะแกรมที่ออกแบบไว้ และทดสอบการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ออกแบบ หัววัดโพรบ วงจรเซนเซอร์ สำหรับวัดค่าไดอิเล็กตริกของไม้และแปลงค่าเป็นแรงดันไฟฟ้า และทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าในอากาศของหัวโพรบและวัดค่าความจุไฟฟ้าของเนื้อไม้นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการวัดค่าความชื้นของไม้ รวมถึงวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรและนำมาเปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่ได้จากเครื่องมือวัดความชื้นที่เป็นมาตรฐานซึ่งผลการวัดมีแนวโน้มความเป็นเชิงเส้นตามที่ต้องการ นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้ออกแบบฟังก์ชันการทำงานของตัวเครื่องโดยการเขียนโปรแกรมควบคุมและสร้างตัวเครื่องสำหรับเป็นต้นแบบในการผลิต

ค่าความชื้นไม้ (%)	ค่าความจุไฟฟ้า(pF)
0	14
12.5	28
12.7	30
15.9	47
29.2	85

ตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของไม้ที่มีความชื้นต่างกันซึ่งวัดค่าโดยใช้มัลติมิเตอร์

ขนาดแผ่นเพลทเซนเซอร์ (mm.)	ค่าความจุไฟฟ้าในอากาศ (pF)
30x36	15
35x42	19
40x48	26

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นเพลทเซนเซอร์แต่ละขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

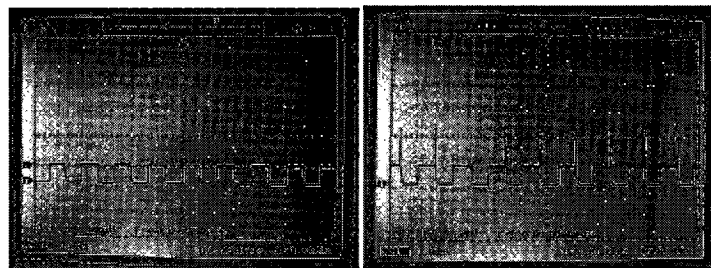
ออกแบบวงจรภาคเซนเซอร์เพื่อวัดค่าไดอิเล็กตริกของไม้และเปลี่ยนเป็นค่าเป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกของสารเมื่อค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงและเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง

4.1 ผลการทดลองวัดค่าสัญญาณที่ได้จากวงจรเซนเซอร์

ผู้วิจัยได้ปรับปรุงวงจรวัดค่าไดอิเล็กตริกของไม้เพื่อให้สามารถวัดค่าได้ดีขึ้นจากเดิมโดยอาศัยการส่งผ่านคลื่นความถี่สูงผ่านวงจรบริดจ์เร็คทิไฟเออร์ โดยอาศัยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของแผ่นเพลทเซนเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงและนำข้อมูลไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดเซนเซอร์ก่อนนำไปวัดเทียบกับค่าความชื้นที่ได้จากเครื่องมือที่เป็นมาตรฐานเพื่อเขียนโปรแกรมคำนวณค่าความชื้นไม้สำหรับสร้างเครื่องมือวัดต่อไป



ภาพที่ 4.1 สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตจากวงจรโพรบวัด

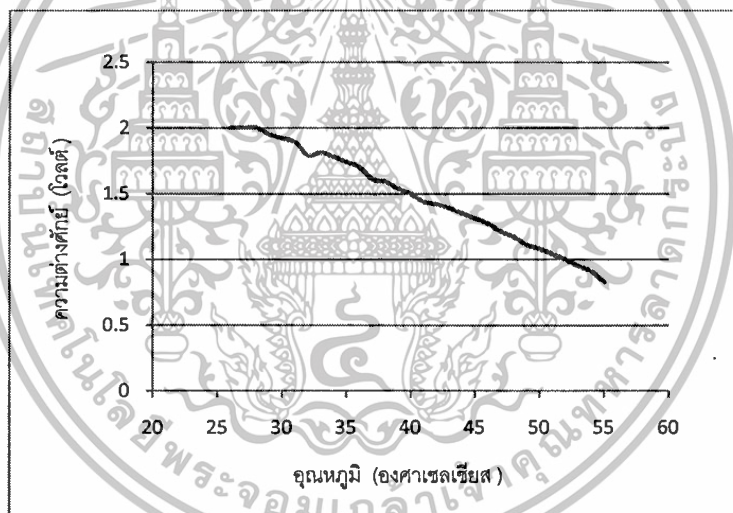


ภาพที่ 4.2 สัญญาณจากเครื่องวัดเมื่อไม้ความชื้น 8 % (ซ้าย) และความชื้น 26 % (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความชื้น ไม้ (%)	ค่าแรงดันไฟฟ้า(V)
0	3.45
1	3.42
3	3.39
9	3.15
13	2.93
18	2.69
22	2.47

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแบบที่ 1



ภาพที่ 4:3 ความคลาดเคลื่อนของความต่างศักย์เนื่องจากอุณหภูมิ

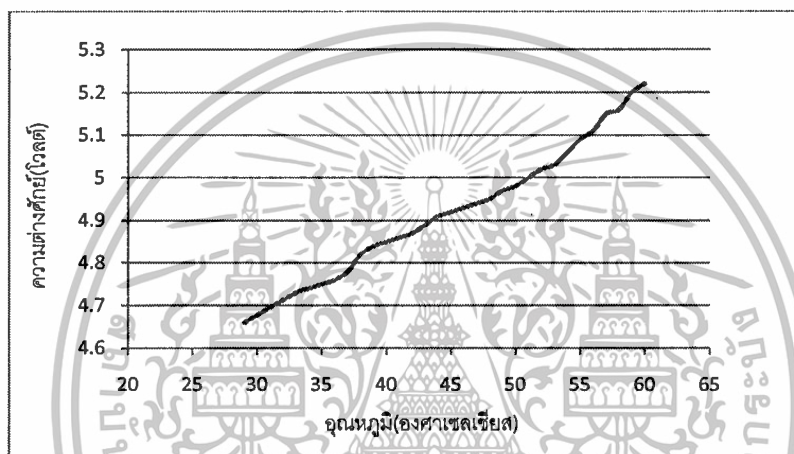
สัญญาณที่ได้จากวงจรวัดค่าไดโอดีทรินซ์ของไม้แบบที่ 2 ซึ่งวัดค่าอิมพีแดนซ์ผ่านวงจรบริดจ์ และแปลงค่าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า

ค่าความชื้น ไม้ (%)	ค่าแรงดันไฟฟ้า(V)
13	4.53
14.4	4.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

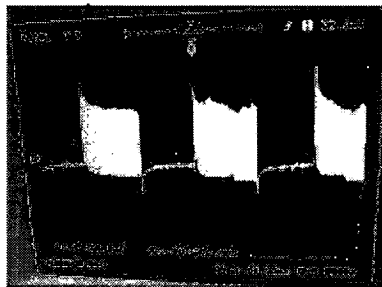
ค่าความชื้นไม้ (%)	ค่าแรงดันไฟฟ้า(V)
16.8	4.52
18.3	4.46
19.7	4.61
20.2	4.62
22.3	4.67

ตารางที่ 4.4 ค่าความต่างศักย์จากวงจรแบบที่ 2 เมื่อไม่มีความชื้นต่างกัน



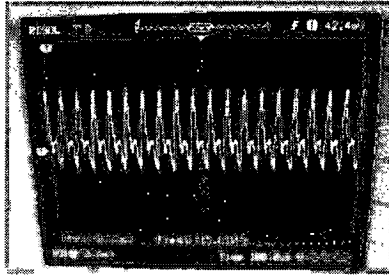
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์จากชุดเซนเซอร์แบบที่ 1 เทียบกับอุณหภูมิ

จากการวิเคราะห์กราฟค่าความต่างศักย์และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงพบว่าวงจร มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวเก็บประจุและวัสดุที่นำมาใช้เป็นหัววัด โพรบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้น

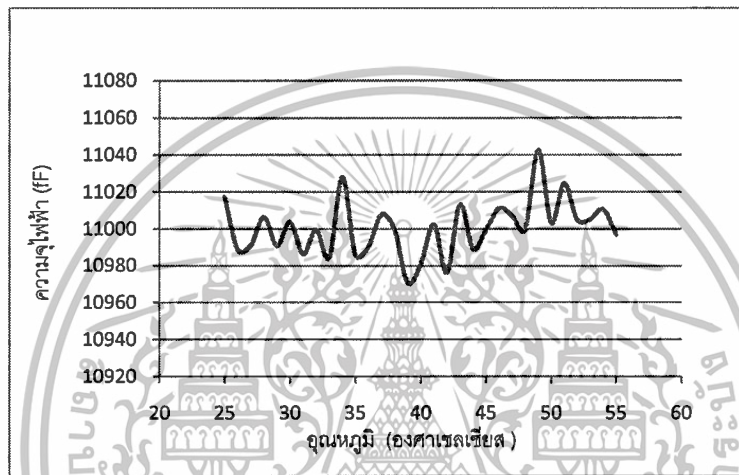


ภาพที่ 4.5 สัญลักษณ์ที่มอดูเลตแล้วซึ่งวัดจากปลายหัวโพรบ

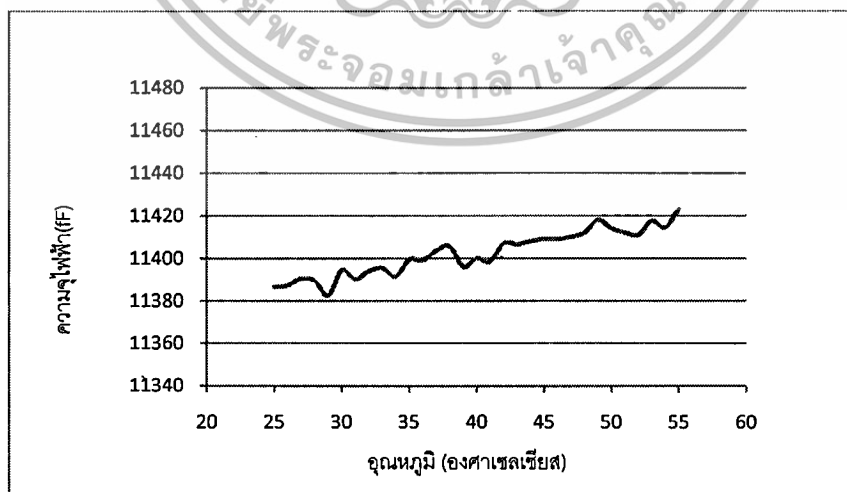
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 สัญญาณความถี่สูง 15 kHz ที่อยู่ในสัญญาณความถี่ต่ำตัวพา 500 Hz



ภาพที่ 4.7 ความจุไฟฟ้าของอากาศเทียบกับอุณหภูมิ

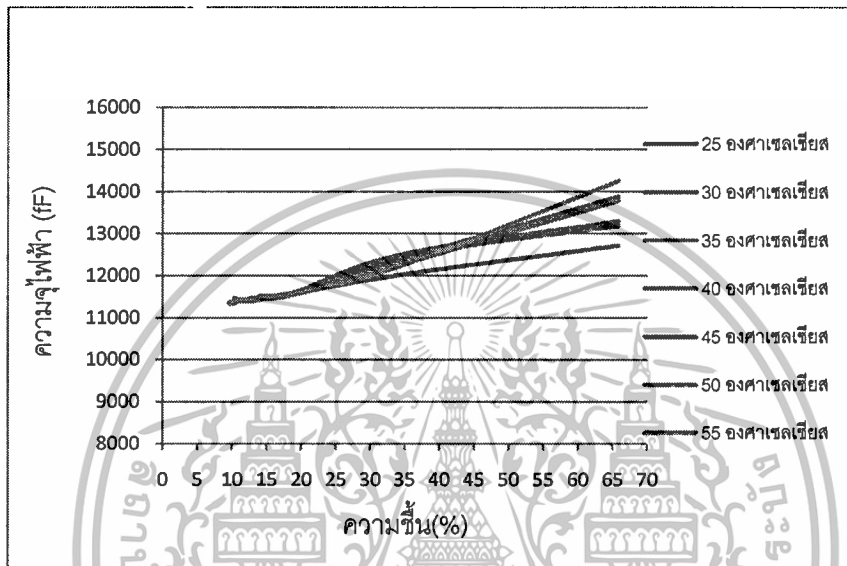


ภาพที่ 4.8 ความจุไฟฟ้าของไม้ที่มีความชื้น 7 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 25-55 องศาเซลเซียส

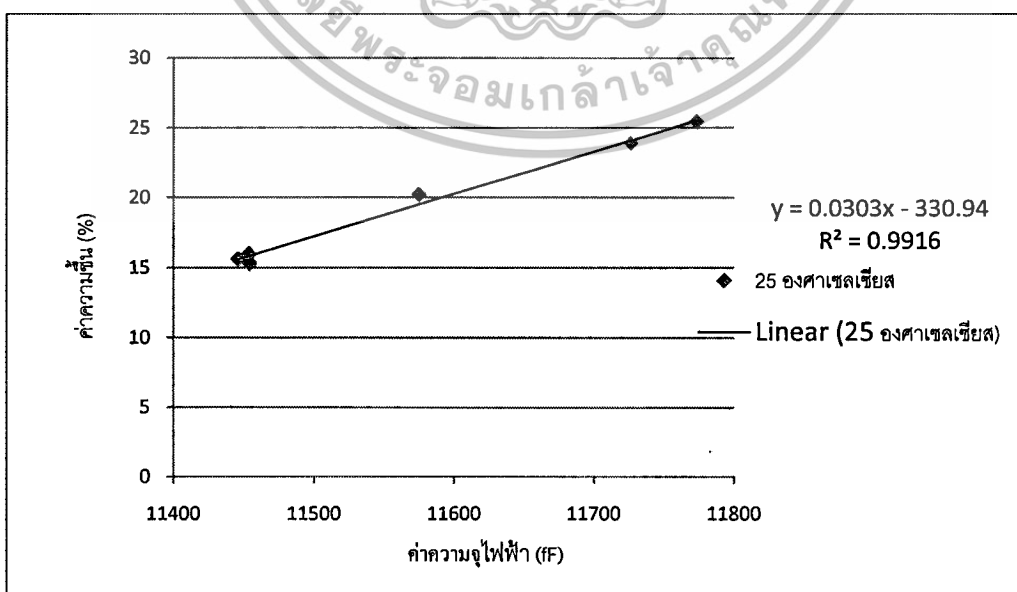
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดความชื้นที่สร้างขึ้น

จากการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าจากเครื่องวัดความชื้นไม้ที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐานและนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความจุไฟฟ้าแปรตามค่าความชื้นของไม้ที่เปลี่ยนแปลง โดยมีแนวโน้มเป็นเชิงเส้นและเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่อุณหภูมิต่างกันจะพบว่าค่าความจุไฟฟ้านั้นเปลี่ยนแปลง โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น



ภาพที่ 4.9 ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับค่าความชื้นของไม้พาสลที่อุณหภูมิ 25-55 องศาเซลเซียส

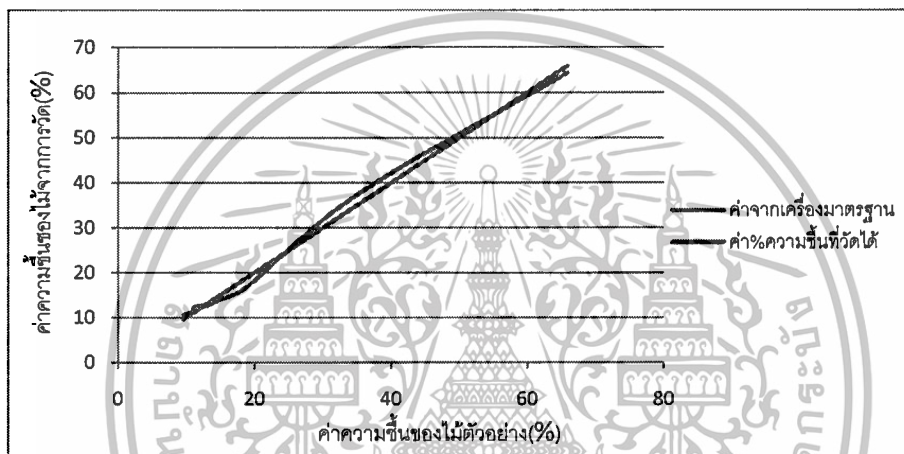


ภาพที่ 4.10 การประมาณค่าสมการเชิงเส้นเพื่อคำนวณค่าความชื้นที่ 25 องศาเซลเซียส

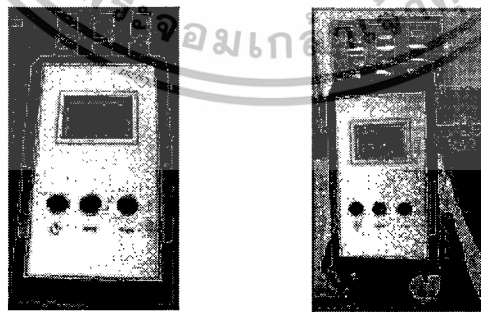
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวัดค่าความชื้นไม้ของเครื่องมือที่สร้างขึ้นเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน

จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าของไม้ตัวอย่างสามารถนำไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงคือค่าความชื้นของกราฟ ดังนั้นใช้การหาค่าความเพี้ยนของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพื่อคำนวณค่าความชื้นที่แท้จริงสามารถใช้ในการเขียนโปรแกรมร่วมกับการใช้สมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของไม้แต่ละชนิดในการคำนวณเพื่อแก้ไขค่าการวัดให้ถูกต้อง



ภาพที่ 4.11 ค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องเทียบกับค่าความชื้นจากเครื่องวัดมาตรฐาน



ภาพที่ 4.12 เครื่องวัดค่าความชื้นไม้ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องมือวัดความชื้นไม้แบบสัมผัส โดยไม่ทำลายพื้นผิวของตัวอย่าง โดยใช้กระบวนการวัดค่าไดอิเล็กตริกของไม้ และเน้นการสร้างตัวเครื่องที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ ในการทดลองและออกแบบเครื่องมือให้ผลสรุปดังนี้

1. ในการทดลองวงจรสำหรับตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าภายในเนื้อไม้ทั้ง 3 แบบซึ่งได้แก่ วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบ ac ในการวัดค่า วงจรแบบบริดจ์ ac และวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้ชิปไอซีวัดค่าความจุไฟฟ้า พบว่าวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้ชิปไอซี ให้ค่าการตอบสนองที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นภายใน ไม้โดยที่มีเสถียรภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าวงจรอื่น และยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากวงจรของตัวต้านทานและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิบริเวณหัวโพรบวัดความชื้น โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์ชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิได้
2. จากการทดลองสามารถออกแบบหัวโพรบวัดความชื้นที่เหมาะสมได้โดยพบว่า หัววัดโพรบบแบบสแตนเลสที่มีลักษณะเป็นแผ่นโค้งครึ่งวงกลม มีลักษณะที่ดีเหมาะแก่การนำมาเป็นโพรบวัดเนื่องจาก มีสภาพคงทนไม่เป็นสนิม ลักษณะผิวโค้งทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับพื้นไม้ผิวเรียบใกล้เคียงกันในแต่ละครั้งของการวัด ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนขณะวัดน้อยลง
3. เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าความชื้นไม้ได้ใกล้เคียงเครื่องมือวัดที่ใช้เปรียบเทียบ ในงานวิจัยนี้สามารถสร้างเครื่องมือวัดความชื้นไม้ต้นแบบที่สามารถวัดค่าความชื้นไม้ได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยมีความคลาดเคลื่อนของการวัดไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อไม้มีความชื้นไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์) ตัวเครื่องมีฟังก์ชันสำหรับวัดค่าความชื้นของไม้แต่ละชนิดที่มีลักษณะเนื้อไม้แตกต่างกัน และใช้พลังงานน้อย มีขนาดเล็ก สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยควรเก็บข้อมูลของไม้แต่ละชนิดที่มีภายในประเทศเพิ่มเติม นอกเหนือจากไม้ตัวอย่างที่นำมาวัดค่า เพื่อเพิ่มความสามารถในการวัดค่าความชื้นไม้ของเครื่องมือ ซึ่ง ข้อมูลของไม้แต่ละชนิดนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ต้องใช้ประกอบการเขียน โปรแกรมควบคุมการประมวลผล และวัดค่าความชื้นของตัวเครื่อง นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานภายในตัวเครื่องก็ เป็นสิ่งสำคัญซึ่งควรปรับปรุงระบบประมวลผลให้ใช้พลังงานน้อยที่สุดเพื่อจะสามารถใช้งานตัวเครื่องได้ นานขึ้น และควรเพิ่มฟังก์ชันการหาค่าเฉลี่ยของการวัดในกรณีที่จำเป็นต้องวัดค่าความชื้นหลายจุดในไม้ ตัวอย่างขึ้นเดียวกัน



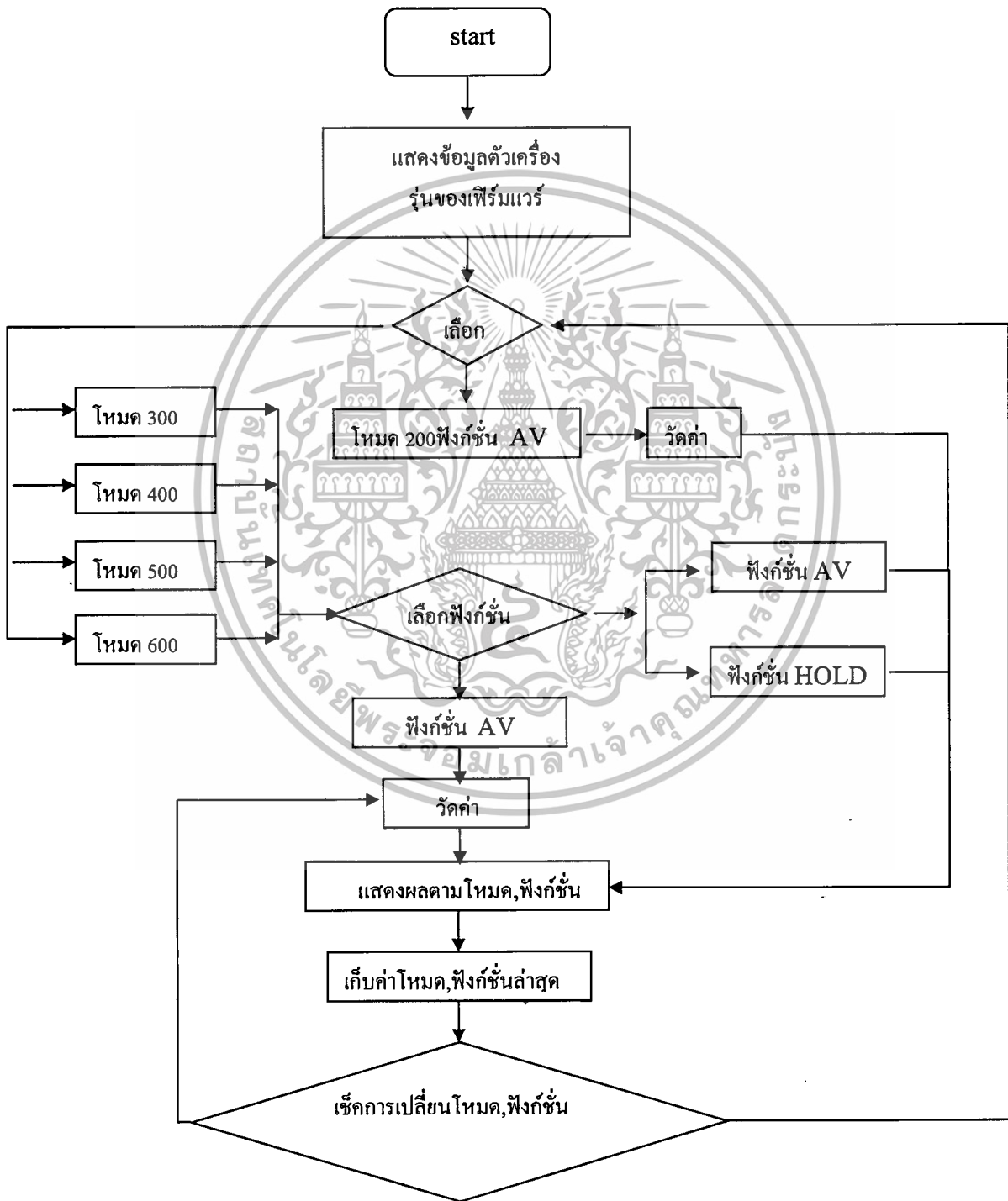
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

แสดงแผนภาพการทำงานของเครื่องวัดความชื้นไม้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[54] METHOD OF MEASURING MOISTURE CONTENT OF DIELECTRIC MATERIALS

[75] Inventors: Robert S. Parker; Frank C. Beall, both of Puyallup, Wash.

[73] Assignee: Weyerhaeuser Company, Tacoma, Wash.

[21] Appl. No.: 421,624

[22] Filed: Sep. 22, 1982

[51] Int. Cl.⁴ G01N 25/56; G01R 27/26

[52] U.S. Cl. 364/550; 73/73; 324/61 R; 364/482

[58] Field of Search 73/73, 74; 324/61 R, 324/61 P; 364/550, 482

[56] References Cited

U.S. PATENT DOCUMENTS

3,124,430	3/1964	Eicken	73/73
3,155,898	11/1964	Chope	324/61 R
3,155,899	11/1964	Davidson	324/61 R
3,155,900	11/1964	Hanken	324/61 R
3,155,902	11/1964	Walls	324/61 R
3,241,062	3/1966	Baird	324/61 R
3,249,865	5/1966	Hanken	324/61 R
3,255,412	6/1966	Ko-Hsin	324/61 R
3,320,946	5/1967	Dethloff et al.	324/61 R X
3,323,045	5/1967	Baird	324/61 R
3,323,047	5/1967	Martin et al.	324/61 R
3,339,137	8/1967	Perry	324/61 R
3,354,388	11/1967	Perry	324/61 R
3,443,219	5/1969	Adams	324/61 R

3,496,460	2/1970	Martin	324/61 R
3,504,280	3/1970	Byrd	324/61 R
3,559,052	1/1971	Fathauer	324/61 R
3,807,055	4/1974	Kraxberger	324/61 R X
4,058,766	11/1977	Vogel et al.	324/61 R
4,259,633	3/1981	Rosenau	324/61 R X
4,399,404	8/1983	Resh	73/73 X

OTHER PUBLICATIONS

Water in Wood by C. Skaar, Syracuse University Press, Syracuse, N.Y., 1972, pp. 35-53.

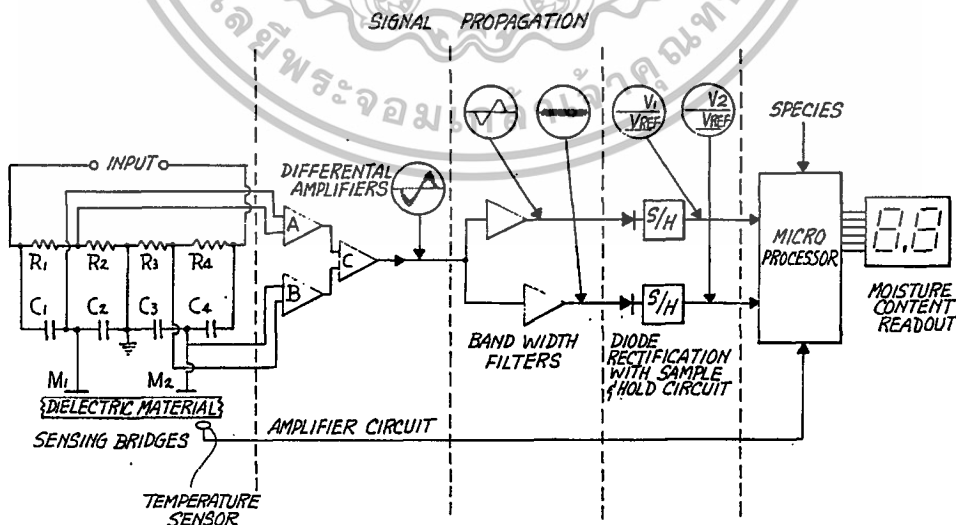
Primary Examiner—Errol A. Krass

Assistant Examiner—Edward R. Cosimano

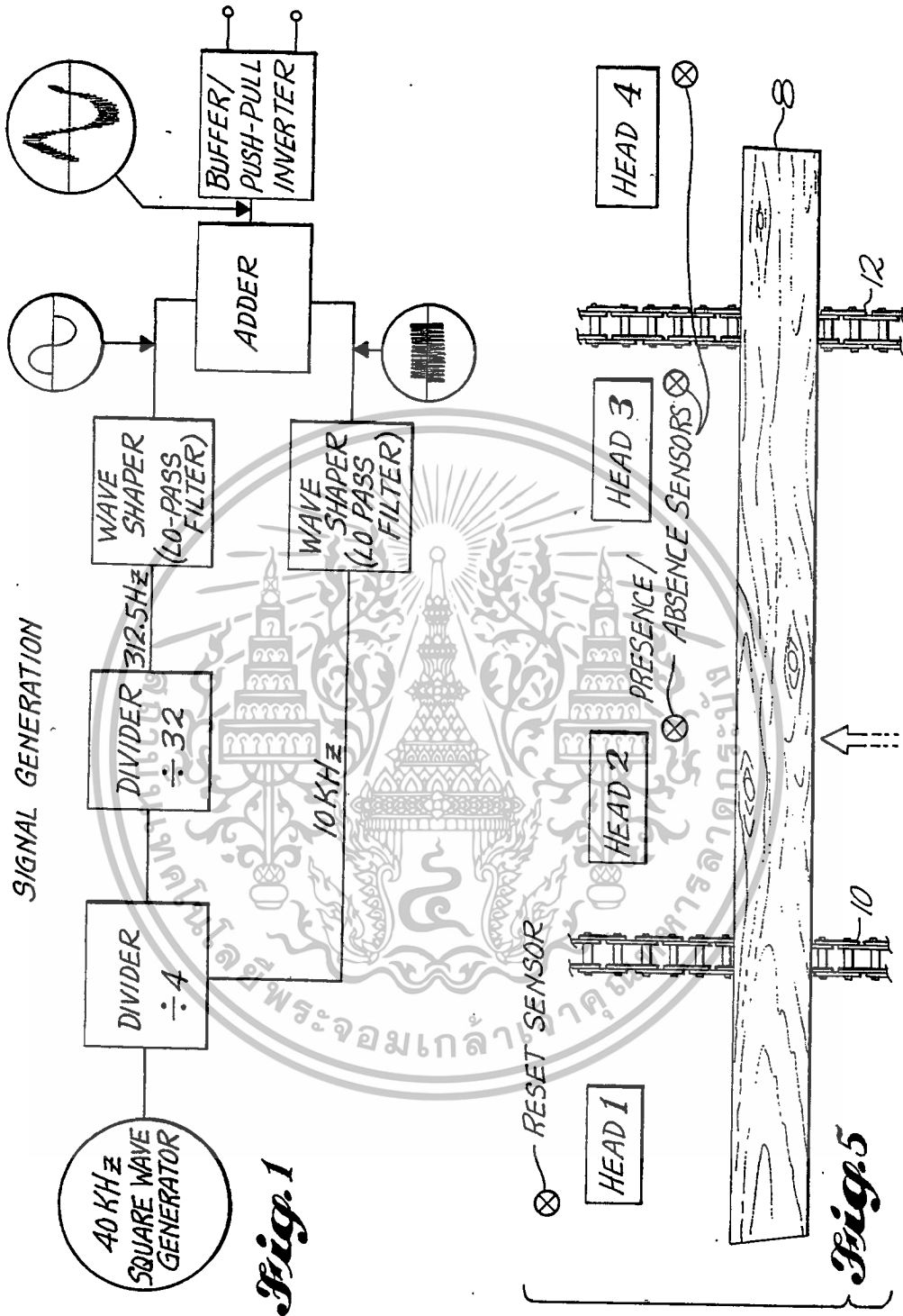
[57] ABSTRACT

The present invention is a method for measurement of moisture in dielectric materials. It is particularly useful for lumber. In the preferred version, at least two alternating current signals whose frequencies differ by a factor of at least 10 are capacitively coupled to the material. The coupling electrodes are in bridge circuits whose unbalance is measured at each frequency. The temperature of the dielectric material is also determined. Bridge unbalance signals are separated and rectified and the voltages, as well as a temperature analog voltage, are entered into a microprocessor programmed with a suitable algorithm to calculate a temperature corrected moisture value. The method overcomes significant inaccuracies in moisture readings due to temperature dependency.

48 Claims, 5 Drawing Figures



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

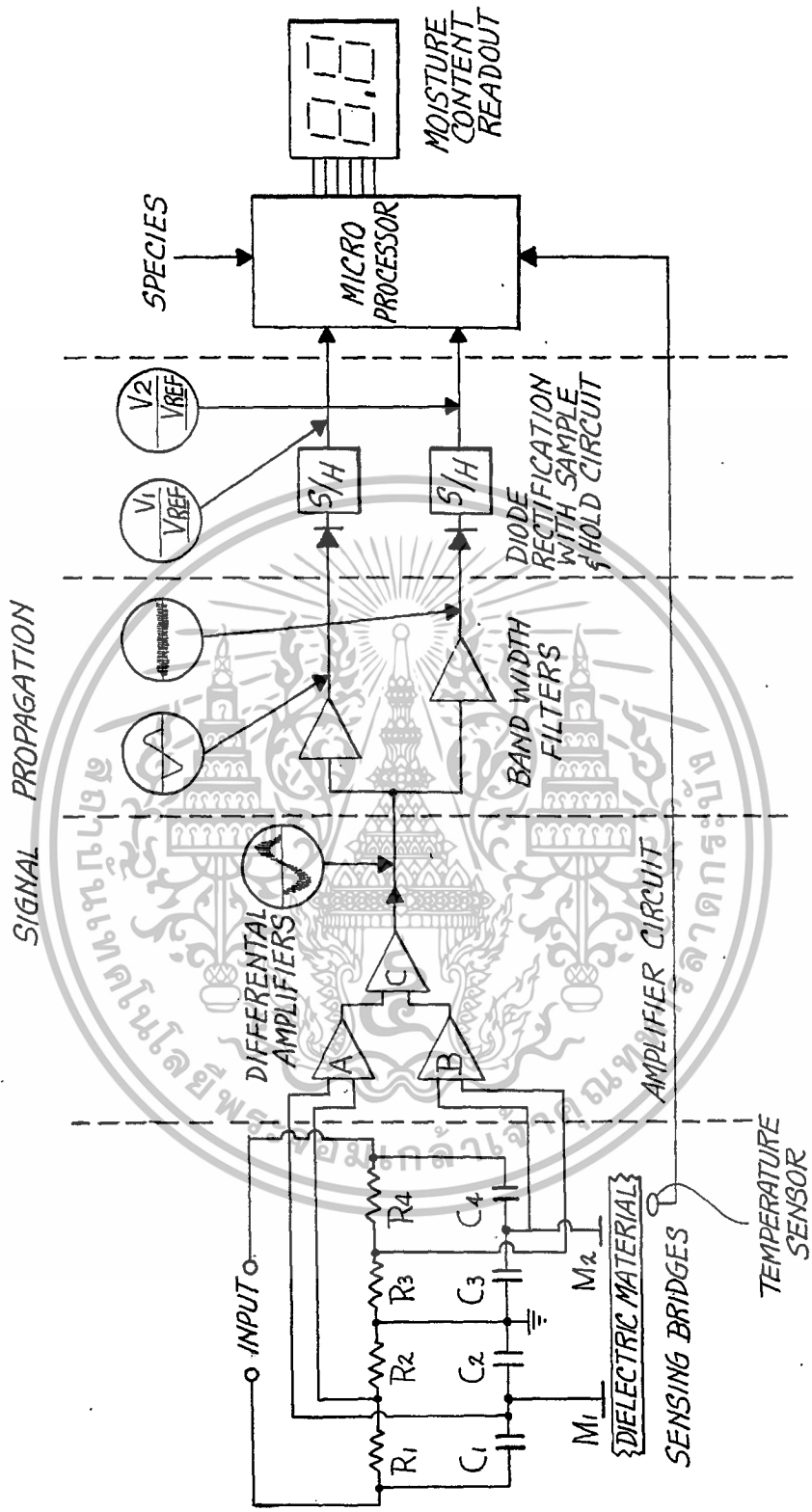


Fig. 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

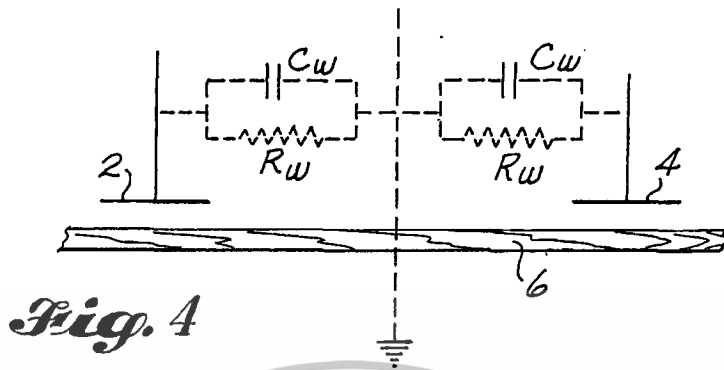


Fig. 4

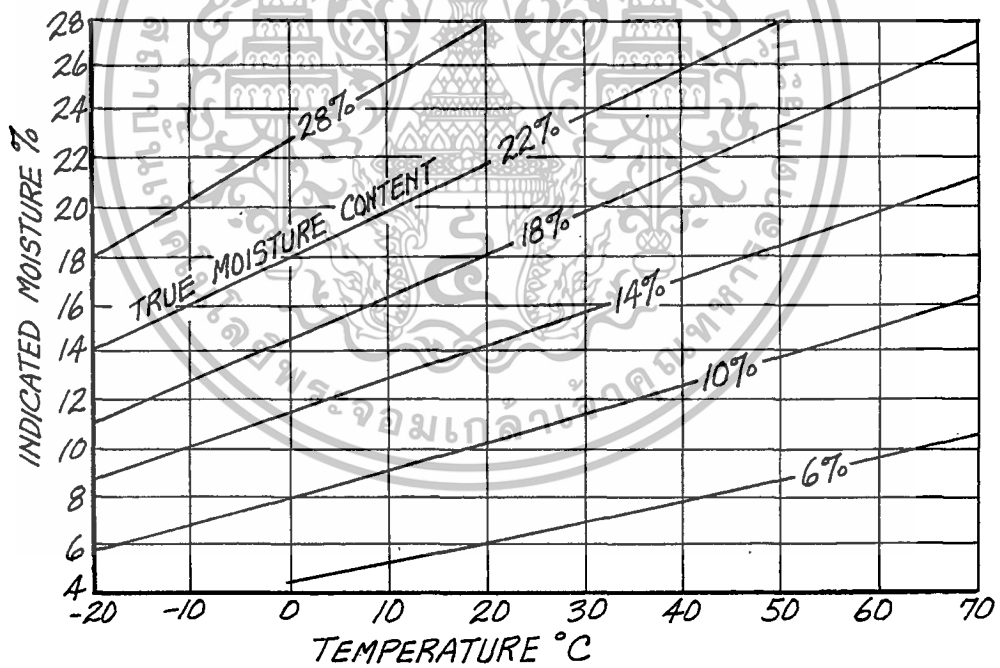


Fig. 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

METHOD OF MEASURING MOISTURE CONTENT OF DIELECTRIC MATERIALS

BACKGROUND OF THE INVENTION

The present invention relates to the measurement of moisture in materials which broadly could be considered as dielectric in their properties. More specifically, it relates to the determination of moisture by measurement of the impedance of the dielectric material at differing alternating frequencies. Provision is made for correcting errors introduced because of temperature variation and variation in the nature of the dielectric material itself. The method is particularly well adapted for measurement of the moisture content of wood.

It is important to control the moisture content of many materials having dielectric properties. Grain can serve as one example. If the moisture content of stored grain is too high, mold growth and ultimate spoilage can result. Wood is another material in which moisture should desirably be controlled within specified limits which depend upon the ultimate application. Wood intended for construction framing should desirably have a moisture content below 20% to minimize fungal attack. Finish lumber, such as that used for trim and moldings, normally is specified with moisture contents at or near those which will be in equilibrium with the ultimate environment. This is typically in the 7-10% range. Wood which is to be adhesively bonded or laminated is normally dried to moisture contents of 12% or below.

Through the years, a number of nondestructive moisture-measuring methods have been developed. Most of these depend upon some electrical property of the material being measured. The earliest instruments for measuring the moisture content of wood determined its electrical resistivity by passing a direct current through it. Handheld moisture meters were soon developed so that moisture content could be readily estimated in either the manufacturing plant or in the field where the product was being used. These normally comprise a pair of pins or needles of predetermined size and spacing which are driven into the wood along the grain direction. The needles are connected to a direct current source and a megohmmeter, which is precalibrated to give a direct estimate of moisture content. Similar meters have been developed for measurement of the moisture in many other materials.

Another type of meter was developed somewhat later that did not depend on making direct contact with the material. These are typically capacitively coupled. They are suitable for use on conveyor lines in a manufacturing plant, and are often used in conjunction with ancillary equipment which can mark or reject high moisture samples for later redrying. Internal impedance is the property most commonly measured. In many cases the internal resistance is by far the most important component of the impedance. Thus, many of the non-contact meters are similar to the direct-current meters in their use of resistivity to estimate of moisture content.

In the case of wood, resistivity is an almost ideal parameter to measure because of its great variation with relatively small differences in moisture content. The resistance of Douglas-fir at 27° C., using needle electrodes 3.1 cm apart and driven into a depth of 0.8 cm, drops from about 22,400 megohms at 7% moisture content to 0.60 megohms at 24% moisture. Accuracy below this moisture range begins to fall off because of the

difficulties in measuring very high resistances. Accuracy also is decreased as the fiber saturation point of the species is approached. No satisfactory instrumental method is yet in use for accurate estimation of moisture content of solid wood members above the fiber saturation point.

The noncontact moisture meters vary considerably in their mode of operation. The most common ones for measuring the moisture content of a dielectric material capacitively couple the material into one arm of a bridge circuit. The bridge unbalance is then measured as two alternating frequencies are impressed across the bridge, either simultaneously or sequentially. These alternating current signals are then filtered into the original component frequencies and rectified to produce DC analog signals. The resultant voltages are a function of the ratio of change in voltage drop across the test capacitor which correspond to each frequency, when the material being tested is located between the plates of the capacitor. Most typically, the estimated moisture content is calculated from the analog voltages by dividing the higher frequency component by the lower frequency component with the inclusion of appropriate constants. Exemplary meters of this type are shown in the patents to Davidson U.S. Pat. No. 3,155,899; Walls U.S. Pat. No. 3,155,902; Baird U.S. Pat. No. 3,241,062; and Liu U.S. Pat. No. 3,255,412.

In U.S. Pat. No. 3,155,902, Walls notes a number of deficiencies in capacitively-coupled moisture meters. A number of these relates to the internal stability and calibration of the electronic component. Two others are a result of uncontrolled outside influences. Walls notes that the measurement is not independent in the position of material between the capacitor plates. He further notes that the measured moisture content has a temperature dependency. However, the inventor offers no solutions for either of these problems. Perry, in U.S. Pat. No. 3,339,137 and 3,354,388, shows a noncontact meter that overcomes the position problem by using opposed electrodes having a fieldfree region between them. His electrodes are at equal voltage and polarity. This system provides compensation for positioning and it is essentially immaterial where the dielectric is located in the void space between the electrodes.

Baird, in U.S. Pat. No. 3,241,062, shows a relatively complex system of temperature compensation. This involves a sensor and associated circuitry which uses a servomotor to adjust a series of potentiometers controlling the output voltage of one of the oscillators. A major problem with this system is the lag time associated with electromechanical system.

One problem appears to be as yet unaddressed. A given moisture meter is normally calibrated so as to work only on a specific dielectric material. Even in the measurement of wood moisture content there is uncompensated variation from species to species. Meters are normally calculated on the basis of coastal Douglas-fir. If, for example, a meter so calibrated is used on pine or hemlock, somewhat different moisture readings will be indicated even though the moisture content of all samples is identical.

The present invention comprises a method for measuring the moisture content of dielectric materials which has an internal electronic compensation for the temperature and nature of the dielectric material being measured. It is of the general type which employs a plurality of alternating current signals of different frequencies

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

impressed across a bridge circuit into which the sample material is capacitively coupled.

SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention is a method of measuring the moisture content of a moisture-containing dielectric material. This is accomplished by capacitively coupling the material into at least one bridge circuit and measuring the resulting bridge unbalance at each frequency when an alternating current having at least two superposed frequencies is applied across each bridge circuit. Within the restrictions imposed by the current state of the art in electronic circuitry, any number n of superposed alternating current frequencies may be applied across the bridge, where n is equal to or greater than 2. Normally two frequencies will give excellent results although resolution is improved with higher numbers of frequencies. The bridge unbalance is determined at each frequency and the AC unbalance voltage at each frequency is converted into a direct-current voltage signal. Simultaneously, the temperature of the material is measured. The direct-current voltages and the voltage analog of the temperature are entered into an algorithm of the following form which can then be solved to display a temperature-corrected moisture content

$$MC = A_0(T) + \sum_{i=1}^n B_i(T) V_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}(T) V_i V_j$$

where MC is moisture content, $A_0(T)$, $B_i(T)$, and $C_{ij}(T)$ are all polynomial functions of temperature where n is a whole number equal to or greater than 2, and V_i and V_j are the direct current amplitudes of the i th and j th frequency components.

Accuracy is improved when there is a significant separation between each of the frequencies employed. When only two frequencies are used, it is desirable that they be different by at least a factor of 10. With wood as a dielectric material, excellent results are obtained when the lowest frequency is equal to or less than 1 kHz and the higher frequency is equal to or greater than 10 kHz. The algorithm to determine moisture content may be solved manually, but it is preferred that the data be entered into a computer such as a microprocessor which gives moisture content as an output on any convenient type of display system.

The nature of the dielectric material will affect the indicated moisture content. Regardless of the material used to calibrate the meter initially, it is within the scope of the present invention to provide simple equations which can compensate for the particular dielectric being measured. For example, appropriate algorithms can be programmed into a microprocessor to correct the initially computed temperature corrected moisture on a given dielectric substance to an actual moisture value, even though the meter was originally calibrated on another dielectric material.

A preferred method uses at least one measuring head in which a pair of coupling electrodes are arranged in a side-by-side relationship. Each electrode is in parallel with a capacitor in one leg of a bridge circuit, with a separate bridge circuit being supplied for each electrode. These bridge circuits are provided in a balanced push-pull arrangement. For many types of dielectric material; e.g., lumber, it is desirable to supply a plurality of measurement heads in a parallel arrangement. In this way the material is sampled at a number of locations. Circuitry can be supplied so that each individual head

can give a moisture readout, or the readouts from the heads may be averaged. The latter method is the one that will normally be used, although individual readouts can supply an indication of moisture variation within any given sample.

The method of the present invention will often be used when the material being measured is passing by a series of heads arranged above a conveyor line. To again use the example of lumber, the moisture content of each board will be individually measured. Boards in which the moisture content is above or below a preset range can be mechanically rejected from the line or printed with an indicator dye so that they can be manually removed at some remote location.

Where the sensing heads are located over a conveyor line which is transporting individual dielectric objects to be metered it is convenient to have a detection means in advance of the heads which signals that a new sample is entering the metering zone. Where the samples are of variable size, such as is typical of lumber in a sawmill, a material detection means may be present before each metering head in the assembly. In this way, the circuitry can be arranged so that only those heads which will be fully coupled to the material will be activated. Any heads which are not fully coupled can be disabled or deactivated in some manner so that their outputs do not enter into an averaged value.

It is further beneficial to include a second material detection means immediately following the measuring heads to indicate when the material has moved from the zone in which it is effectively coupled to the heads. This means can send a signal to the microprocessor indicating that the sample has moved from the measuring zone, whereupon the microprocessor can be electronically reset to be ready for measuring the next object which enters the metering zone.

It has been found that when a side-by-side electrode arrangement is used in which the electrodes form part of a capacitive leg of balanced individual bridge circuits, the meter is relatively insensitive to variations in distance between the electrodes and material being measured.

It is an object of the present invention to provide a method for measuring the moisture content of moist dielectric materials which has improved accuracy over methods hereto available.

It is another object to provide a method for measuring the moisture content of dielectric materials which compensates automatically for the temperature of the material being measured.

It is a further object to provide a noncontact method of measuring moisture content of materials which is tolerant of variations in the distance between the material and the measuring head.

It is yet another object to provide a method for measuring the moisture content of materials which provides compensation for the dielectric characteristics of the specific material being measured.

It is still another object to provide a method for accurately measuring the moisture content of individual discreet objects passing by a metering station located adjacent to a conveyor line.

These and many other objects will become readily apparent upon reading the detailed description of the invention when taken in conjunction with the attached drawings.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

FIG. 1 is a block diagram showing the signal generation section of the moisture meter.

FIG. 2 is a block diagram showing the metering bridges and the signal processing section of the meter.

FIG. 3 is a graph showing the variation in apparent moisture content with changes in temperature.

FIG. 4 shows the electrical equivalent of the sample as it is seen by the measuring electrodes.

FIG. 5 is a diagrammatic arrangement showing a piece of lumber passing beneath a plurality of sensing heads.

DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

The following detailed description will use wood as an example of a dielectric material whose moisture content is being measured. It will be apparent to one skilled in the art that the method to be described would be suitable for many different types of dielectric materials which tend to absorb moisture. Among these might be grains, starches, sugar, tobacco, fabrics of various types, etc.

Reference to FIG. 1 shows the signal generation section of the moisture meter. The single oscillator employed is a 40-kHz square wave generator. A signal is sent through a first divider which divides the signal produced by a factor of four to produce a 10 kHz output signal. The 10 kHz signal is split and a portion serves as the input to a second divider which divides by a factor of 32 to produce an output having a frequency of 312.5 Hz. Both the 10 kHz and the 312.5 Hz signals are directed to wave-form shapers which remove the harmonic content and deliver an output wave form which is essentially sinusoidal. The wave form shapers are basically low-pass filters designed to pass the selected frequencies. The output of each of the low-pass filters is trimmed to provide a 10-volt peak-to-peak signal. These two signals are then combined in an adder to produce a complex wave which is now 20-volts peak-to-peak. The combined frequencies are finally passed through a buffer/phase inverter which delivers a push-pull output signal to the measuring bridges.

The output from the signal-generating section is delivered to two push-pull bridge circuits. As seen in FIG. 2, the first bridge comprises resistors R_1 and R_2 on one side of the bridge and capacitors C_1 and C_2 on the other side of the bridge. The second bridge circuit comprises equivalent resistors R_3 and R_4 on one side and capacitors C_3 and C_4 on the other side. Measuring electrode M_1 is arranged in parallel with capacitor C_2 , while measuring electrode M_2 is in parallel with capacitance C_4 . The output of the first bridge is entered the first of a matched pair of differential amplifiers, here designated A. The output of the second bridge enters an equivalent differential amplifier B. The output of these differential amplifiers forms the input for a third differential amplifier designated C. The output of amplifier C will still be a complex wave form containing components from the original 10 kHz and 312.5 Hz input signals. The individual components at each frequency will reflect the unbalance in the bridge circuits respectively caused by the 10 kHz and 312.5 Hz input signals.

The output of the final differential amplifier is directed to a pair of filters which separate the individual frequency components from the complex alternating current wave. The results are again individual signals at

10 kHz and 312.5 Hz which are not somewhat diminished over their original amplitude. These are now rectified to produce direct current voltages which can be continuously compared with DC reference voltages reflecting a balanced condition. The DC currents are now directed through sample and hold circuits from which point they enter a microprocessor.

There are normally two other inputs into the microprocessor. One is from a temperature sensor which determines the temperature of the material being measured. This sensor can be a thermistor, infrared detector, or one of the other sensing means well known in the art. Its output is typically a voltage analog. Finally, another input to the microprocessor is an analog voltage signal related to the nature of the dielectric material being measured. In the case of wood, this will normally be the species. The microprocessor is programmed with an algorithm that processes the input information and sends a signal to an output device which indicates the moisture content of the material.

The generalized algorithm has the form

$$MC = A_0(T) + \sum_{i=1}^n B_i(T) V_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}(T) V_i V_j$$

where MC is moisture content, $A_0(T)$, $B_i(T)$, and $C_{ij}(T)$ are all polynomial functions of temperature, n is a whole number equal to or greater than 2, and V_i and V_j are the direct current amplitudes of the i th and j th frequency components.

This generalized algorithm covers the situation where n superposed alternating current frequencies are applied across the measuring bridges. In most cases, such as the one just described, n will be equal to 2. When $n=2$, the algorithm may be simplified to the form

$$MC = a + bV_1 + cV_2 + dV_1V_2$$

where MC is moisture content, V_1 and V_2 are the direct current voltage signals, and the coefficients are temperature dependent according to their relationships

$$a = \sum_{i=0}^m a_i T^i; b = \sum_{i=0}^m b_i T^i; c = \sum_{i=0}^m c_i T^i; \text{ and } d = \sum_{i=0}^m d_i T^i$$

with m being a whole number equal to or greater than 1.

Unless extreme accuracy of measurement is required, for most purposes first-order approximations of the coefficients may be made as follows where $a = a_0 + a_1 T$, $b = b_0 + b_1 T$, $c = c_0 + c_1 T$, and $d = d_0 + d_1 T$, where T is the temperature of the material being measured.

Coastal Douglas-fir is the reference wood by which most moisture meters are calibrated. For a meter constructed using the previously described circuitry, the algorithm coefficients for Douglas-fir are as follows:

$a_0 =$	1.4	$a_1 =$	0.0326
$b_0 =$	33.7	$b_1 =$	0.346
$c_0 =$	6.13	$c_1 =$	-0.0198
$d_0 =$	-16.1	$d_1 =$	0.141

For any particular meter construction, the coefficients of the algorithm can be determined experimentally by the measurement of dielectric materials having known moisture contents at some predetermined tem-

perature. The temperature may be determined in a number of ways. Where the dielectric has been in a given ambient environment for a sufficient time to attain temperature equilibrium, simply measuring the ambient temperature will be sufficient. Otherwise, conventional measuring instruments can be used to determine the temperature of each sample.

Reference to FIG. 3 shows the error that can be introduced in conventional D.C. resistance moisture readings of wood by failure to account for temperature. This figure is adapted from a chart now widely used in the industry, but it should be considered only an approximation at best. As one example, wood which is to be adhesively bonded to form laminated structural beams generally should have a moisture content of 12% or below. Referring to FIG. 3, wood at 12% true moisture, measured at 20° C., would be acceptable for laminating. If the same wood was measured warm, as at the unstacker following kiln dryers, the indicated moisture kiln content would be considerably higher. When measured at 60° C., the indicated moisture would be about 17.5% even though the actual moisture was 12%. Without a correction being applied, this wood would be unnecessarily rejected as being too wet. To date, it has been so awkward to apply temperature corrections where the sample population literally consists of hundreds of thousands of boards, that it has not been practical to apply an effective form of temperature correction of moisture readings. The forementioned U.S. Pat. No. 3,241,062 to Baird is apparently the only device which attempted to incorporate automatic temperature correction and, for whatever reasons, it has apparently never been commercially produced. The device employing the presently described method appears to be a major step forward in improving the accuracy of moisture determination by automatic, near instantaneous correction of the temperature dependence problem.

The matter of the nature of the dielectric material being measured is another problem which has received very little attention. As mentioned before, moisture meters for wood are normally calibrated on coastal Douglas-fir. The person who wished to use these meters on other species was at some risk of obtaining inaccurate values because of the known differences in dielectric properties between woods of different species. It is readily within the skill of the art to program the microprocessor so that information on the species being measured can be entered simply by setting a switch, or some similar device, to the proper setting. A linear approximation can be used to give a species correction adequate for all practical purposes. This is of the form

$$MC_{corr} = k_1 + k_2 MC$$

where the coefficients k_1 and k_2 may readily be determined experimentally by measuring wood of different species having known moisture contents. For coastal Douglas-fir, the coefficient k_1 is 0 and k_2 is 1, so that the slope of the curve is unity. For most other commercially important wood species, the coefficient k_1 will fall in the range between 4 and 10 and k_2 will lie between 0.5 and 1.2.

A noncontact capacitively-coupled moisture meter of the type utilized in the present method can normally be used to measure moisture contents from about 4% up to approximately 28%. Somewhat less accuracy will be experienced at the extreme ends of this range. This is true also of resistance-type meters. While the noncontact meter will actually measure the capacitive reac-

tance of the dielectric to which it is coupled, in the above moisture content range the resistance will form the most important component of the reactance. FIG. 4 shows two electrodes 2,4 at opposite instantaneous polarity which are capacitively coupled to a piece of wood 6. When these electrodes are wired as shown in FIG. 2 in a push-pull balanced bridge circuit, they will "see" the wood capacitance and resistance as if it was effectively between the electrode and ground. The effective capacitance of C_w is very small so that its reactance is very large at the frequencies employed. This reactance is also large in comparison with R_w . In effect, the meter exemplified herein is actually measuring wood resistance in similar fashion to a D.C. meter having electrodes actually driven into the wood.

FIG. 5 shows a board 8 being borne on conveyor chains 10,12 and approaching a bank of four metering heads. It is assumed that the left ends of all boards approaching the metering station will be in approximately the same position, as could readily be controlled by a line bar, but that these boards will of variable length. Three of the four heads has a sensor immediately preceding it to detect whether or not the board will be fully coupled to the head. These sensors can be electrical switches, photocells, or any other well-known type of proximity indicator. Even the electrical output of the head as a board passes could be programmed into the microprocessor as a presence/absence signal.

In the present example, it is assumed that all of the boards will be long enough to engage at least the first head. It is for this reason that a sensor is not required preceding it. As shown in FIG. 5, heads 1, 2, and 3 will be activated. Head 4 will not be activated since the board is not long enough to be fully coupled to the head; i.e., the material would not be under the full area of the head. This will indicate to the microprocessor that an average moisture content should be calculated only on the basis of the output of the first three heads. Head 4 will either be deactivated or its output will be ignored in the moisture determination. In addition to giving an average moisture reading, the output may be designed to indicate the moisture content from each head in order to give an indication of the uniformity of moisture distribution within the sample. The microprocessor could also be programmed with ancillary equipment so as to automatically reject a board which showed an overly high moisture content at any measuring head. After the board has passed by the heads, the reset sensor will be triggered to indicate to the microprocessor that the next data received will be from a new sample. Information from each sample passing the measuring heads is stored in the sample and hold circuits (FIG. 2) until it is cleared by the approach of a new sample.

Having thus disclosed the best mode known to the inventors of practicing the present process, it will be apparent to those skilled in the art that many variations can be made without departing from the spirit of the invention. It is therefore intended that the scope of the invention be limited only by the following claims.

What is claimed is:

1. A method of measuring the moisture content of a moisture-containing dielectric material by capacitively coupling it into at least one bridge circuit and measuring the bridge unbalance when an alternating current input having superposed frequencies is applied across each bridge circuit, the improvement which comprises:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- a. applying n superposed alternating current frequencies to the bridge, where n is a whole number equal to or greater than 2;
- b. determining the bridge unbalance caused at each frequency and converting it into a direct current voltage signal;
- c. measuring the temperature of the material; and
- d. computing the moisture content by entering the voltage signals and temperature into an algorithm having the form:

$$MC = A_0(T) + \sum_{i=1}^n B_i(T) V_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}(T) V_i V_j$$

where MC is moisture content, $A_0(T)$, $B_i(T)$, and $C_{ij}(T)$ are all polynomial functions of temperature n is a whole number equal to or greater than 2, and V_i and V_j are the direct current amplitudes of the i th and j th frequency components.

2. The method of claim 1 which includes providing a computer which receives inputs of bridge unbalance voltage and temperature and solves the algorithm to indicate a moisture content.

3. The method of claims 1 or 2 in which the lowest and highest frequencies differ at least by one power of 10.

4. The method of claim 3 where the lowest frequency is equal to or less than 1 kHz.

5. The method of claim 3 where the highest frequency is equal to or greater than 10 kHz.

6. The method of claims 1 or 2 in which the moisture content is corrected for the particular characteristics of the dielectric material by entering the uncorrected value into the algorithm

$$MC_{corr} = k_1 + k_2 MC$$

where k_1 and k_2 are coefficients unique to the dielectric material being measured.

7. The method of claim 6 in which the dielectric material is wood.

8. The method of claims 1 or 2 including providing two bridge circuits in a balanced push pull arrangement each bridge circuit having a sensing electrode in parallel with a capacitor in one leg of the bridge circuit, each electrode having an adjacent zone within which it is effectively capacitively coupled to the material being measured.

9. The method of claim 8 in which the coupling electrodes are arranged side-by-side in a measuring head.

10. The method of claim 9 including providing a plurality of measurement heads arranged in parallel.

11. The method of claim 10 including providing conveying means to convey the dielectric material to and from a working proximity with the measuring heads.

12. The method of claim 11 which includes providing material detection means in advance of the heads to determine which heads which will be fully coupled to the dielectric material and to deactivate any heads which are not fully coupled.

13. The method of claim 11 which further includes providing material detection means following the measuring heads to indicate when the material has moved out of the zone in which it is effectively coupled to the heads.

14. The method of claim 12 which further includes providing material detection means following the measuring heads to indicate when the material has moved

out of the zone in which it is effectively coupled to the heads.

15. The method of claim 13 in which the dielectric material is wood.

16. The method of claim 14 in which the dielectric material is wood.

17. In the method of measuring the moisture content of a moisture containing dielectric material by capacitively coupling the material into at least one bridge circuit and measuring the bridge unbalance when an alternating current input having two superposed frequencies is applied across each bridge circuit, the improvement which comprises:

- a. determining the bridge unbalance caused at each frequency and converting it into a direct current voltage signal,
- b. measuring the temperature of the material, and
- c. computing the moisture content by entering the voltage signals and temperature into an algorithm having the form

$$MC = a + bV_1 + cV_2 + dV_1V_2$$

where MC is moisture content, V_1 and V_2 are the direct current voltage signals and the coefficients are temperature dependent according to the relationships

$$a = \sum_{i=0}^m a_i T^i, b = \sum_{i=0}^m b_i T^i, c = \sum_{i=0}^m c_i T^i, \text{ and } d = \sum_{i=0}^m d_i T^i$$

with m being a whole number equal to or greater than 1.

18. The method of claim 17 in which the algorithm coefficients are first order approximations where $a = a_0 + a_1 T$, $b = b_0 + b_1 T$, $c = c_0 + c_1 T$, and $d = d_0 + d_1 T$, where T is the temperature of the material being measured.

19. The method of claims 17 or 18 which includes providing a computer which receives inputs of bridge unbalance voltage and temperature and solves the algorithm to indicate a moisture content.

20. The method of claims 17 or 18 in which the lowest and highest frequencies differ at least by one power of 10.

21. The method of claim 20 where the lowest frequency is equal to or less than 1 kHz.

22. The method of claim 20 where the highest frequency is equal to or greater than 10 kHz.

23. The method of claims 17 or 18 in which the moisture content is corrected for the particular characteristics of the dielectric material by entering the uncorrected value into the algorithm

$$MC_{corr} = k_1 + k_2 MC$$

where k_1 and k_2 are coefficients unique to the dielectric material being measured.

24. The method of claim 23 in which the dielectric material is wood.

25. The method of claims 17 or 18 including providing two bridge circuits in a balanced push pull arrangement each bridge circuit having a sensing electrode in parallel with a capacitor in one leg of the bridge circuit, each electrode having an adjacent zone within which it is effectively capacitively coupled to the material being measured.

26. The method of claim 25 in which the coupling electrodes are arranged side-by-side in a measuring head.

27. The method of claim 26 including providing a plurality of measurement heads arranged in parallel.

28. The method of claim 27 including providing conveying means to convey the dielectric material to and from a working proximity with the measuring heads.

29. The method of claim 28 which includes providing material detection means in advance of the heads to determine which heads will be fully coupled to the dielectric material and to deactivate any heads which are not fully coupled.

30. The method of claim 28 which further includes providing material detection means following the measuring heads to indicate when the material has moved out of the zone in which it is effectively coupled to the heads.

31. The method of claim 29 which further includes providing material detection means following the measuring heads to indicate when the material has moved out of the zone in which it is effectively coupled to the heads.

32. The method of claim 30 in which the dielectric material is wood.

33. The method of claim 31 in which the dielectric material is wood.

34. A method of measuring the moisture content of moisture containing dielectric material which comprises:

- a. providing at least one pair of electrodes in a coupled relationship with the material;
- b. driving the electrodes with an alternating current signal comprising two superposed frequencies so that opposite electrodes of a pair are at essentially equal voltages of opposite polarity, each electrode being located in an arm of separate bridge circuits;
- c. sensing the unbalance signals in the bridge circuits caused by the presence of the material adjacent to the electrodes, said signals containing components of unbalance at each frequency;
- d. combining the unbalance signals from the two bridges;
- e. separating the combined signal into its individual frequency components and rectifying each component to form direct current voltage signals proportional to the bridge unbalance caused at each frequency;
- f. sensing the temperature of the dielectric materials; and
- g. computing the moisture content by entering the voltage signals and the temperature into an algorithm having the form

$$MC = a + bV_1 + cV_2 + dV_1V_2$$

where MC is moisture content, V_1 and V_2 are the direct current voltage signals, and the coefficients are temperature-dependent according to the relationships

$$a = \sum_{i=0}^m a_i T^i, b = \sum_{i=0}^m b_i T^i,$$

$$c = \sum_{i=0}^m c_i T^i, d = \sum_{i=0}^m d_i T^i,$$

with m being a whole number equal to or greater than 1.

35. The method of claim 34 in which the algorithm coefficients are first order approximations where $a = a_0$.

$+ a_1 T, b = b_0 + b_1 T, c = c_0 c_1 T,$ and $d = d_0 + d_1 T,$ where T is the temperature of the material being measured.

36. The method of claims 34 or 35 which includes providing a computer which receives inputs of bridge unbalance voltage and temperature and solves the algorithm to indicate a moisture content.

37. The method of claims 34 or 35 in which the lowest and highest frequencies differ at least by one power of 10.

38. The method of claim 37 where the lowest frequency is equal to or less than 1 kHz.

39. The method of claim 38 where the highest frequency is equal to or greater than 10 kHz.

40. The method of claims 34 or 35 in which the moisture content is corrected for the particular characteristics of the dielectric material by entering the uncorrected value into the algorithm

$$MC_{corr} = k_1 + k_2 MC$$

where k_1 and k_2 are coefficients unique to the dielectric material being measured.

41. The method of claim 40 in which the dielectric material is wood.

42. The method of claims 34 or 35 including providing two bridge circuits in a balanced push pull arrangement each bridge circuit having a sensing electrode in parallel with a capacitor in one leg of the bridge circuit, each electrode having an adjacent zone within which it is effectively capacitively coupled to the material being measured.

43. The method of claim 42 in which the coupling electrodes are arranged side-by-side in a measuring head.

44. The method of claim 43 including providing a plurality of measurement heads arranged in parallel.

45. In the method of measuring the moisture content of a moisture containing dielectric material by capacitively coupling the material into at least one bridge circuit and measuring the bridge unbalance when an alternating current input having two superposed frequencies is applied across each bridge circuit the improvement which, comprises:

- a. providing a plurality of sensing heads to simultaneously sample the material at a number of different locations, each head having an adjacent sensing zone within which it is effectively coupled to the material being measured;
- b. further providing conveyor means for transporting the material into and out of coupled relationship with the heads;
- c. using a computer to analyze the bridge unbalance signals at each frequency and indicate moisture content; and
- d. determining when the material has moved out of the sensing zone and is no longer effectively coupled to the heads to indicate to the computer that it should reset and await the arrival of a new sample of material.

46. The method of claim 45 which further includes providing a plurality of material detection means in advance of the heads to signal the computer that the material is in position to be fully coupled to any heads which are engaged by the material and to deactivate any heads which are not engaged.

47. The method of claims 45 or 46 which further includes material detection means following the measuring heads to indicate when the material has moved out of the zone in which it is effectively coupled to the heads.

48. The method of claim 47 in which the dielectric material is wood.

* * * * *

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE
CERTIFICATE OF CORRECTION

PATENT NO. : 4,580,233

DATED : April 1, 1986

INVENTOR(S) : Robert S. Parker; Frank C. Beall

It is certified that error appears in the above—identified patent and that said Letters Patent is hereby corrected as shown below:

In column 10, line 37, " $d=d_0d_1T$," should read $--d=d_0+d_1T, --$

[SEAL]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

United States Patent [19]

Wagner et al.

[11] Patent Number: **4,683,418**

[45] Date of Patent: **Jul. 28, 1987**

[54] **MOISTURE MEASURING METHOD AND APPARATUS**

[75] Inventors: **Edward D. Wagner; Richard R. Trautwein**, both of Rogue River, Oreg.

[73] Assignee: **Wagner Electronic Products, Inc.**, Rogue River, Oreg.

[21] Appl. No.: **638,020**

[22] Filed: **Aug. 6, 1984**

[51] Int. Cl.⁴ **G01R 27/26**

[52] U.S. Cl. **324/61 P; 324/61 R**

[58] Field of Search **324/61 R, 61 P, 65 R, 324/437**

218755 12/1961 Austria 324/61 P
2150928 4/1972 Fed. Rep. of Germany 324/61 P

Primary Examiner—Reinhard J. Eisenzopf
Assistant Examiner—Jose M. Solis
Attorney, Agent, or Firm—Dellett, Smith-Hill and Bedell

[57] **ABSTRACT**

Moisture in wood veneer strips received from a drying oven is measured by passing a first radio frequency signal through the veneer for reception by a receiving plate, transmitting a second radio frequency signal in out-of-phase relation to the first radio frequency signal for reception by the receiving plate, the second signal not passing through the wood. The first and second radio frequency signals induce a potential in the receiving plate, the induction of the first radio frequency signal varying in accordance with the moisture contained in the veneer. The potential of the receiving plate is then measured to determine the extent of moisture in the veneer.

[56] **References Cited**

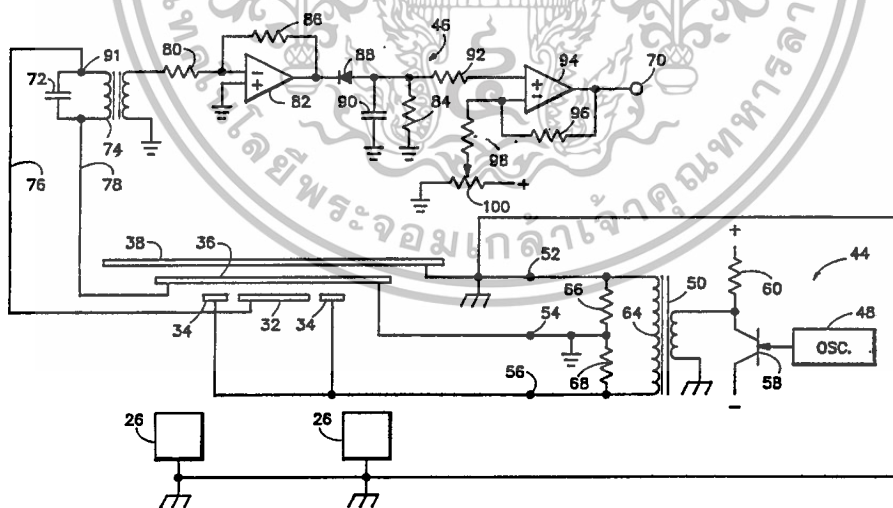
U.S. PATENT DOCUMENTS

3,959,723 5/1976 Wagner 324/61 P
4,377,783 3/1983 Wagner 324/61 R

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

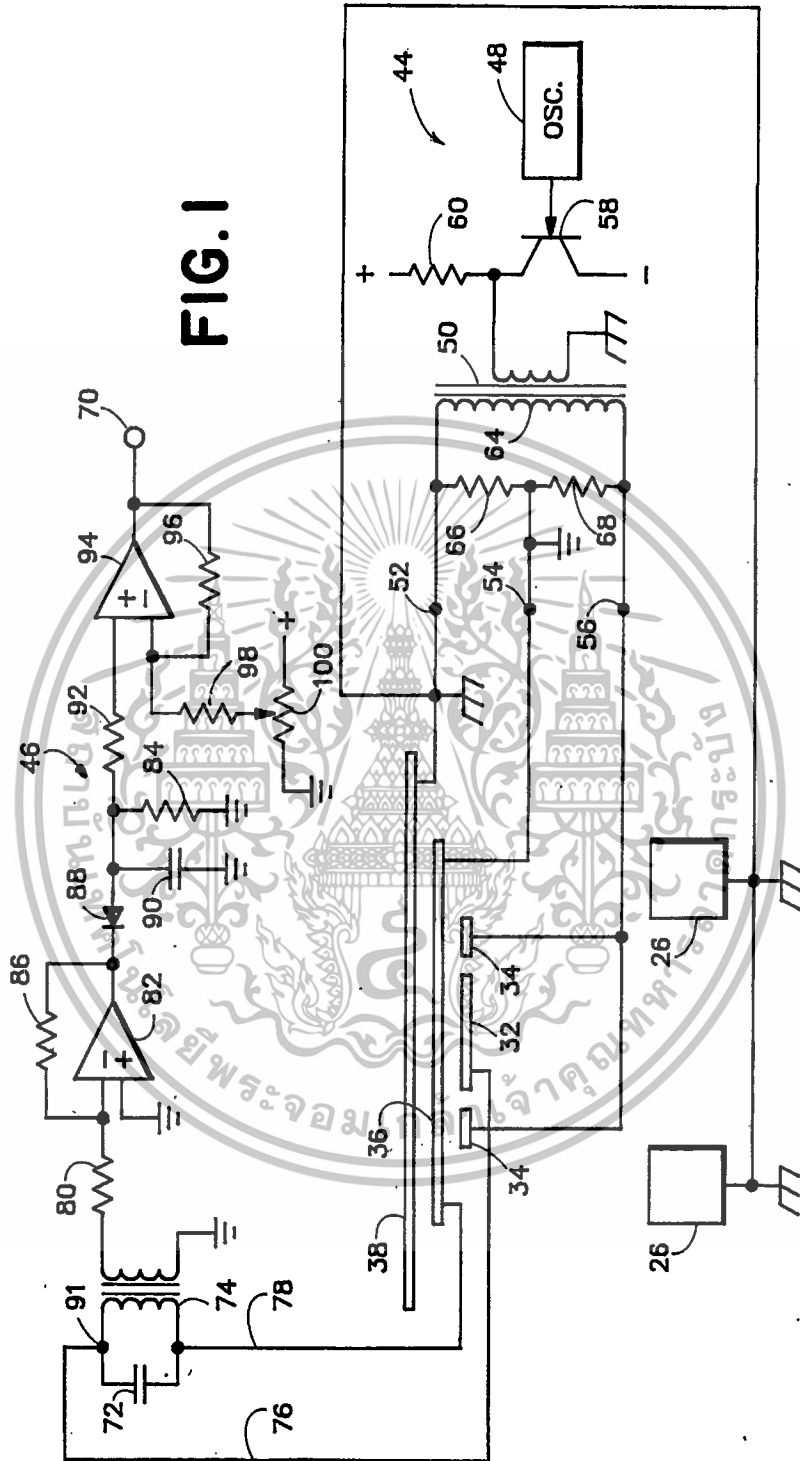
236230 7/1960 Australia 324/61 R

11 Claims, 4 Drawing Figures



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIG. 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

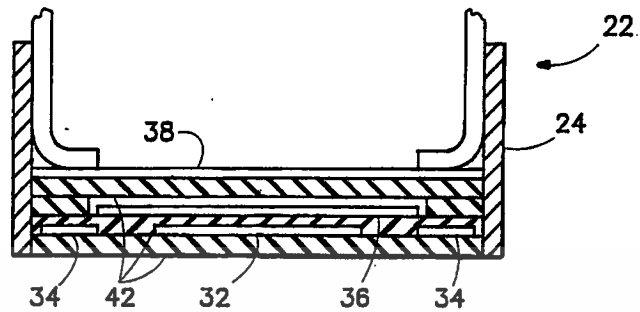


FIG. 2

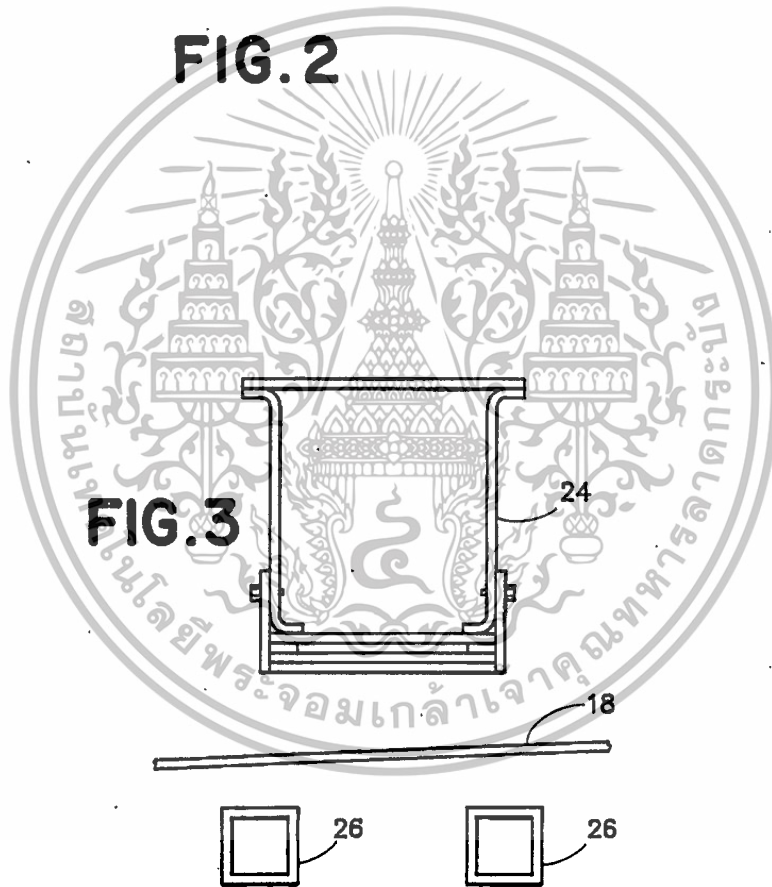


FIG. 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

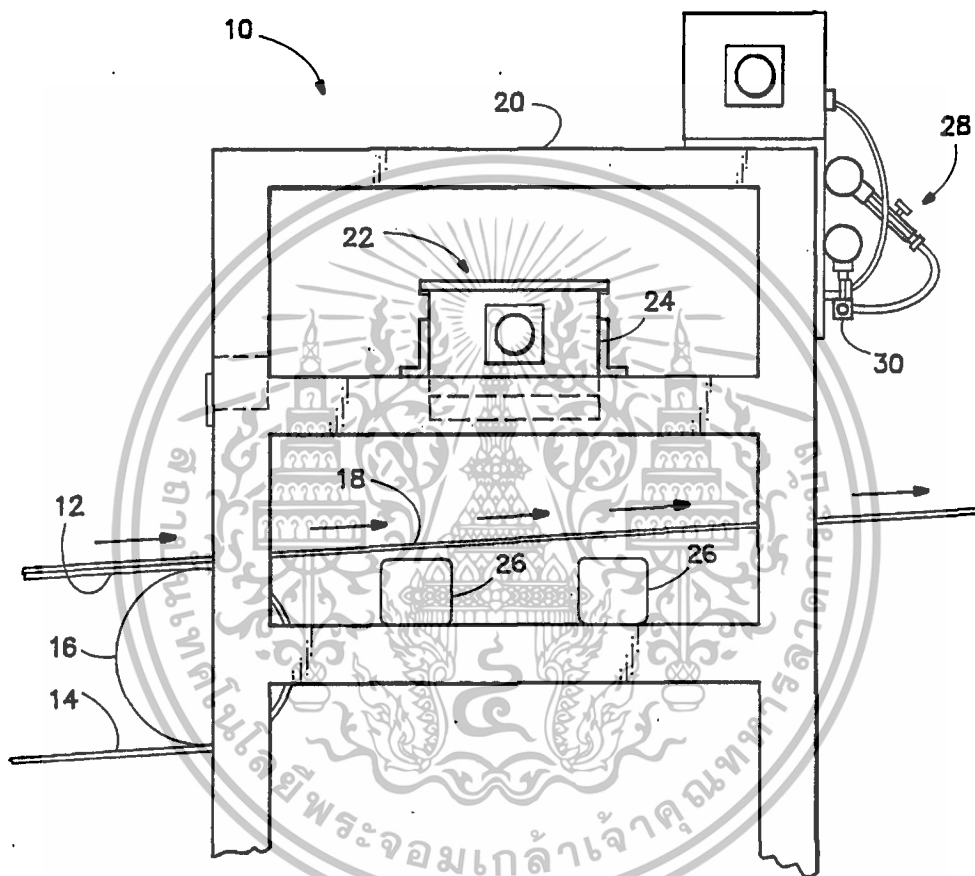


FIG. 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOISTURE MEASURING METHOD AND APPARATUS

BACKGROUND OF THE INVENTION

The present invention relates to a method and an apparatus for measuring moisture in material, and particularly to an improved apparatus which is less sensitive to the positioning or thickness of the material than prior art devices.

Moisture measuring devices of the prior art typically employ some kind of contacting means for making a conductive connection with material in which moisture is to be measured so that the moisture can be determined by electrical conduction. Unfortunately, the contacting means or brushes are subject to breakage and shorting whereby the moisture indications tend to become inaccurate. Further, even if the brushes are in good condition, the degree of electrical contact provided with the material under test is nonuniform.

Moisture detectors have been developed which do not require contact with the material but instead employ capacitive coupling or the like. Many, however, are quite sensitive to the position of the material relative to the sensor conductor, as well as to the thickness of the material, and therefore indications derived on a production line basis can be somewhat un dependable. Also, the conveying means upon which the material is transported can short out the measuring system such that a dependable reading is not obtained.

In prior U.S. Pat. No. 4,377,783, a measuring system is set forth in which transmitting and receiving plates are offset along the path of the measured material, and a conductive path in the veneer and the grounded conveyor is employed as part of the circuit. While very efficacious, there is again some dependency upon accurate contact with the material being measured.

In prior application Ser. No. 494,953 filed May 16, 1983 now U.S. Pat. No. 4,563,635 moisture in wood veneer strips is measured by passing the veneer strips between arrays of plates including a transmitting plate on one side of the veneer and a juxtaposed receiving plate on the other. Phase plates on either side of and on the same level as the transmitting plate are empowered by a signal having the reverse phase to that applied to the transmitting plate. When wet veneer passes between the plate arrays, part of the transmitted signal is shunted reducing the signal received by the receiving plate. While this approach reduces sensitivity to vertical position of the veneer strips, eliminates problems associated with accidental grounding of the veneer and eliminates the need for mechanical contact with the veneer, in practice some unwanted signal shunting occasionally occurs as a veneer sheet initially enters the space between the transmitting and receiving plates, resulting in a false moisture detection signal. Also, the moisture detection apparatus disclosed in the prior application requires use of electronics equipment both above and below the veneer. The equipment mounted below the veneer tends to collect dust and debris which can effect moisture readings.

It would therefore be desirable to provide a moisture detection apparatus wherein moisture detection is not only substantially independent of thickness variations in the veneer and of the vertical position of the veneer between detector and transmitter plates but is also independent of the horizontal position of the veneer as it approaches the transmitting and detecting plates. Fur-

ther, it would be desirable if the detection apparatus were mountable largely in a single package above the veneer so that dust and debris cannot collect on lower portions of the apparatus and thereby interfere with moisture readings.

SUMMARY OF THE INVENTION

According to the present invention, in a preferred embodiment thereof, the material, e.g. wood veneer, is transported along a path into a region between a sensor assembly and a pair of sensor transmitter bars.

The sensor assembly comprises in part a detector plate, a pair of phase plates on either side of and on the same level as the detector plate, a signal plate parallel with and above the detector and phase signal plates, and a ground plate above and parallel with the signal plate. The sensor assembly also comprises a source of split phase oscillating signal having a neutral, designated "machine ground", coupled to the signal plate, a first oscillating signal output, designated "earth ground", coupled to the ground plate and to the sensor transmitter bars, and a second oscillating signal output, 180 degrees out of phase with the first oscillating signal output and coupled to the phase plates.

When there is no wet veneer between the sensor assembly and the transmitter bars, coupling between the sensor transmitter bars and the detector plate tends to drive the potential of the detector plate toward earth ground. At the same times coupling between the phase plates and the detector plate tends to drive the detector plate to a potential 180 degrees out of phase with earth ground, taking machine ground as a reference. As a result the detector plate, in the absence of a wet veneer, tends to float at a potential relatively near machine ground. When wet veneer enters the area between the sensor assembly and the transmitter bars, coupling increases between the detector plate and the earth grounded transmitter bars, driving the detector plate closer to earth ground. Thus the potential difference between the detector and signal plates is increased in the presence of wet veneer.

The sensor assembly further comprises a detector circuit, mounted above the ground plate, coupled to detect the potential difference between the detector and signal plates and to produce a control signal when the potential difference is high enough to indicate the presence of wet veneer. The control signal may then be used to drive a moisture indicator or alarm.

The ground plate shields equipment mounted above the ground plate from signals transmitted by the signal plate. The signal plate shields and the detector plate from the ground plate so that detector plate potential is primarily dependent on coupling between the detector plate and the phase plates and the transmitter bars. The phase plates help to compensate for changes in vertical position of the veneer; when the veneer moves higher, coupling between the detector plate and the transmitter bars increases driving the detector plate closer to earth ground. However, coupling between the phase plates and the detector plate also increases, driving the detector plate away from earth ground. The two effects tend to cancel for variations in vertical position of the veneer.

The present invention is thus insensitive to vertical position of the veneer and has demonstrated no false readings as veneer is inserted into the sensing area. Further, only the transmitter bars are located below the veneer presenting little opportunity for unacceptable

collection of dust or debris. Also the transmitter bars, being at earth ground potential, may be connected to the signal source in the sensor assembly through structural steel only, eliminating the need for extensive wiring to interconnect circuits above and below the veneer.

It is accordingly an object of the present invention to provide an improved apparatus for detecting moisture in plywood veneer or other materials.

It is a further object of the present invention to provide an improved apparatus for moisture detection wherein such apparatus is economical in construction and reliable in operation.

It is another object of the present invention to provide an improved moisture detecting apparatus which is largely independent of vertical positioning of the material relative to the sensing means.

It is a further object of the present invention to provide an improved moisture detecting apparatus which is largely unaffected by collection of dust and debris on components mounted below the material.

It is a further object of the present invention to provide an improved moisture detecting apparatus which does not require extensive electrical connections between circuits above and below the material being tested.

The subject matter which we regard as our invention is particularly pointed out and distinctly claimed in the concluding portion of this specification. The invention, however, both as to organization and method of operation, together with further advantages and objects thereof, may best be understood by reference to the following description taken in connection with the accompanying drawings wherein like reference characters refer to like elements.

DRAWINGS

FIG. 1 is a combination schematic and block diagram of the moisture detecting apparatus according to the present invention.

FIG. 2 is a cross-sectional view of a portion of the sensor assembly showing the relative placement of the phase signal plates, the detector plate, the signal plate and the ground plate according to the present invention.

FIG. 3 is a cross-sectional view of the present invention showing the relative position of the sensor assembly, the sensor transmitter bars, and the material being tested.

FIG. 4 is an end view of the moisture detecting apparatus of the present invention mounted in a frame.

DETAILED DESCRIPTION

Referring to the drawings and particularly to FIG. 4, illustrating moisture detecting apparatus 10 according to the present invention, a conveyor comprising upper run 12 and lower run 14, suitably comprising chains or belts, are trained about head roll 16. The conveyor receives a plurality of plywood veneer strips or pieces 18 from a veneer dryer (not shown), deposited upon the conveyor for transport in the direction indicated by the arrows between the legs of support table 20.

Table 20 carries therebeneath sensor assembly 22, contained in elongated cabinet 24, and transmitter bars 26 in parallel relation spaced about 4 inches apart underneath cabinet 24. The underside of cabinet 24 and the top of transmitter bars 26 are vertically spaced approximately four and one half inches apart in the specific example. Sensor assembly 22 and transmitter bars 26 extend perpendicular to the direction of motion of ve-

neer strips 18 for the width of the conveyor. Table 20 also carries marking means 28 comprising sprayer 30 for marking veneer strips in which a predetermined amount of moisture is detected.

Referring to FIG. 2, depicting a cross-sectional view of the lower portion of cabinet 24 of sensor assembly 22, contained in the underside of cabinet 24 are a plurality of longitudinally oriented conducting metal plates supported in generally facing relation to the veneer strips conveyed therebelow. Cabinet 24 centrally supports detector plate 32 and phase signal plates 34 disposed in laterally spaced relation on either side of detector plate 32 and in the plane thereof, i.e. such that a strip of veneer first passes under one of the phase signal plates 34, then under detector plate 32, and then under the other phase signal plate 34. In the specific example, detector plate 32 may have a width of approximately one and a half inches and a length comparable to that of cabinet 24 so as to extend along the width of the entire conveyor system. Phase signal plates 34 in the specific example are each about one half inch wide and are spaced approximately five inches from detector plate 32. Phase signal plates 34 are also comparable in length to the length of the entire cabinet.

Signal plate 36 is also centrally mounted on the underside of cabinet 24 approximately one sixteenth inch above and in parallel relation with detector plate 32, the plates being separated by insulating material 42. Signal plate 36, in the specific example, is approximately four and a half inches wide, extending about one and a quarter inch beyond either edge of detector plate 32. Ground plate 38 is mounted on top of the under side of cabinet 24 about one quarter inch above and in parallel relation with signal plate 36, separated by insulating material 42. Ground plate 38 extends over the width of the underside of cabinet 24, approximately twenty inches in the specific example. Ground plate 38 and signal plate 36 are also comparable in length to the length of cabinet 24.

The arrays of plates suitably comprise printed or etched conductors on circuit board sections, insulators 42, composed of epoxy glass and forming the bottom of cabinet 24.

Referring to FIG. 3, depicting a cross-sectional view of cabinet 24 and sensor transmitter bars 26 and veneer strip 18, the top runs 12 of the conveyor are positioned so that the strips 18 of veneer will pass between cabinet 24 and transmitter bars 26 about one half to one inch above the transmitter bars. This spacing is suitable for measuring moisture in wood having a thickness from a fraction of an inch up to about two inches. The strips 18 of veneer may travel at a small angle from horizontal without effecting operation of the present invention.

Referring to FIG. 1, a combination circuit and block diagram is illustrated for the moisture detector 10 according to the present invention. In addition to plates 32, 34, 36 and 38 mounted on the underside of cabinet 24 sensor assembly 22 further comprises signal generating means 44. Signal generating means 44 produces radio frequency (suitably 100 KHz) signals at terminals 52 and 56. With terminal 54 taken as a neutral reference, "machine ground", the signals at terminals 52 and 56 are 180 degrees out of phase with one another. Signal generating means 44 comprises oscillator 48, suitably comprising a type 12060 integrated circuit manufactured by Motorola, with output to a gate terminal of a VMOS field effect transistor 58. Transistor 58, suitably comprising a type VN10KM, has a source terminal con-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ected to a negative supply and a drain terminal connected to a positive supply via resistor 60. Signal generating means 44 further comprises Ferroxcube cored transformer 50, with primary driven by the drain voltage of transistor 58, having secondary winding 64 shunted by resistors 66 and 68 in series. The junction of resistors 66 and 68 forms machine ground terminal 54 while the two leads of the transformer 50 secondary winding provide the earth ground signal at terminal 52 and the reverse phase signal at terminal 56.

Detector means 46, connected to detector plate 32 via lead 76 and to signal plate 36 via lead 78, includes a tuned circuit comprising parallel connected capacitor 72 and the primary winding of ferrite core transformer 74 tuned substantially to the frequency of signal generating means 44. The signal across the tuned circuit is coupled through transformer 74 and input resistor 80 to a first operational amplifier 82 provided with a feedback resistor 86 and a second input terminal grounded. The AC output of amplifier 82 is detected with diode 88 having its anode coupled to an input of comparator amplifier 94 through resistor 92 and shunted to ground through capacitor 90 in parallel with resistor 84. Amplifier 94 is provided with a second input terminal coupled via resistor 98 to the moveable tap of potentiometer 100 connected between a positive voltage and ground. The potential between detector plate 32 and signal plate 36 is amplified by amplifier 82 and detected by diode 88 to provide a negative voltage across capacitor 90. A second input of comparator amplifier 94 is set by means of potentiometer 100 to establish a threshold such that if the negative charge on capacitor 90 increases above a predetermined level, the output at terminal 70 will, via intermediate amplifiers not shown, operate sprayer 30. That is, moisture is ordinarily indicated when the negative voltage on capacitor 90 is relatively high. Feedback resistor 96 produces a hysteresis effect such that once the sprayer starts to operate, it will continue to do so until the negative voltage across capacitor 90 decreases to a negative value less than the value at which spraying started, whereby erratic or intermittent operation of sprayer 30 is prevented.

Signal plate 36 is coupled to terminal 54 and is thus held at machine ground. Ground plate 38 and sensor transmitter bars 26 are coupled to earth ground at terminal 52. Phase signal plates 34 are coupled to terminal 56 such that the potential on phase signal plates 34 is 180 degrees out of phase with earth ground.

Considering the overall operation of the moisture detecting apparatus 10 illustrated in FIGS. 1 through 4, when there is no wet veneer 18 between sensor assembly 22 and transmitter bars 26, coupling between sensor transmitter bars, at earth ground, and detector plate 32 tends to drive detector plate 32 toward earth ground. At the same time coupling between phase plates 34 and detector plate 32 tends to drive the detector plate to a potential 180 degrees out of phase with earth ground. As a result detector plate 32 in the absence of wet veneer 18, tends to float at a potential relatively near machine ground. Therefore the potential difference between detector plate 32 and signal plate 36 is relatively small in the absence of wet veneer.

When wet veneer 18 enters the area between sensor assembly 22 and transmitter bars 26, coupling between transmitter bars 26, at earth ground, and detector plate 32 increases, driving the detector plate closer to earth ground. Thus the potential difference between detector plate 32 and signal plate 36, at machine ground, is rela-

tively larger in the presence of wet veneer 18, and generally increases with the dampness of the veneer.

The increase in potential difference between detector plate 32 and signal plate 36 caused by insertion of wet veneer 18 between sensor assembly 22 and sensor transmitter bars 26 results in an increase in negative charge across capacitor 90 in detector means 46. If the negative voltage across capacitor 90 is larger than the positive voltage applied to the inverting input of comparator amplifier 94, comparator amplifier 94 initiates a control signal at terminal 70 causing sprayer 30 to mark the wet veneer. Potentiometer 100 is set such that a control signal output at terminal 70 does not occur unless the negative voltage across capacitor 90 is sufficiently large. Since the voltage across capacitor 90 increases negatively with the dampness of veneer 18, sprayer 30 does not operate unless veneer 18 is sufficiently damp. Thus the minimum dampness necessary to initiate spraying may be controlled by adjustment of potentiometer 100.

As the thickness of veneer 18 increases, or as the height of the veneer above the sensor transmitter bars increases, coupling between the veneer and the detector plate increases, tending to drive the potential of detector plate 32 closer to earth ground. However, at the same time, coupling between phase signal plates 34 and detector plate 32 also increases tending to drive the potential of detector plate 32 180 degrees out of phase from earth ground. Thus the change in signal coupling from phase plates 34 tends to offset the change in the signal coupling from the veneer due to variations in the thickness or vertical position of the veneer, reducing the possibility of a false indication of wetness.

Since the signal detected by sensor assembly 22 is not dependent on signal shunting by veneer 18 partial insertion of veneer 18 in the sensing area beneath sensor assembly 22 does not result in false moisture readings. Also, since dry veneer is of low conductivity, and since detection of moisture depends on the coupling of a large portion of the veneer in the sensor area to earth ground, inadvertent or intentional grounding of the veneer outside the sensing area has no significant affect on moisture sensitivity.

As can be seen, most of the sensing apparatus is contained within cabinet 24 mounted above the veneer. Only the two sensor transmitter bars 26 are mounted below the veneer. Since these bars are connected to earth ground, they may be coupled to equipment in cabinet 24 through the structural steel of table 20. Therefore no wiring is required between sensing equipment mounted above and below the veneer. Also sensor transmitter bars 26 have small upper surface areas which do not collect much dust or debris and are relatively simple to clean in any case.

While the detection of moisture in veneer is particularly set forth herein, it will be understood that the apparatus is not restricted thereto but is applicable to other materials.

While we have shown and described a preferred embodiment of our invention, it will be apparent to those skilled in the art that many changes and modifications may be made without departing from our invention in its broader aspects. We therefore intend the appended claims to cover all such changes and modifications as fall within the true spirit and scope of our invention.

We claim:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Apparatus for measuring the moisture content of material, said apparatus comprising:

first conductor means disposed in spaced facing relation to said material;

second conductor means disposed in spaced facing relation to said material and in adjacent spaced relation to said first conductor means;

third conductor means disposed in facing relation to said material and positioned opposite said first and second conductor means while being generally separated from said first and second conductor means by said material during the presence of said material;

receiving means;

means for energizing said first and third conductor means in out of phase relation with respect to a common reference whereby coupling between first and second conductor means and coupling between second and third conductor means create a potential in said second conductor means during the presence or absence of said material; and

means for connecting said second conductor means to said receiving means for registering said potential of said second conductor means with respect to a fixed reference potential whereby moisture in said material is disposed in coupling relation between said second and third conductor means to alter the potential of said second conductor means so that moisture can be detected according to the change in potential of said second conductor means.

2. The method of measuring the moisture content of material comprising:

passing a first radio frequency signal through said material for reception by a receiving plate;

transmitting a second radio frequency signal in out-of-phase relation to said first radio frequency signal with respect to a common reference, said second signal being transmitted from a source adjacent said receiving plate without passing through said material, said first and second radio frequency signals inducing a potential in said receiving plate, the induction of said first radio frequency signal varying in accordance with the moisture contained in said material; and

measuring the potential of said receiving plate to determine the extent of said moisture.

3. The apparatus according to claim 1 wherein said third conductor means comprises at least one grounded conductive bar positioned beneath the path of said material, said first and second conductor means being located above the path of said material such that said material passes between said third conductor means and the other conductor means.

4. Apparatus for measuring the moisture content of material being conveyed on a conveyor along a generally horizontal path, said apparatus comprising:

a detector conductor adjacent the path of said material on a first side of said conveyor so as to face a first side of said material conveyed on said conveyor;

a first transmitting conductor positioned generally opposite said detector conductor in sufficiently close proximity to said detector conductor so that radio frequency energy can be coupled between said first transmitting conductor and said detector conductor, said first transmitting conductor being adjacent the path of said material on a second side

of said conveyor so as to face a second side of material as conveyed on said conveyor;

an additional transmitting conductor positioned adjacent said detector conductor on said first side of said conveyor in sufficiently close proximity to said detector conductor so that radio frequency energy can also be coupled between said additional transmitting conductor and said detector conductor; receiving means;

means for providing a source of radio frequency energy connected between said first transmitting conductor and said additional transmitting conductor for energizing said first and additional conductors in opposite phase relation with respect to one another whereby coupling between said transmitting conductors and said detector conductor creates a potential in said detector conductor; and

means for connecting said detector conductor to said receiving means for registering said potential of said detector conductor whereby when moisture in said material is disposed in coupling relation between said first transmitting conductor and said detector conductor, the potential of said detector conductor is altered so that moisture can be detected according to the change in potential of said detector conductor.

5. The apparatus according to claim 4 wherein said first transmitting conductor comprises at least one grounded bar positioned beneath the path of said material.

6. The apparatus according to claim 4 wherein said first transmitting conductor comprises a pair of grounded bars positioned beneath the path of said material, and wherein said additional transmitting conductor comprises a pair of plates positioned above the path of said material.

7. The apparatus according to claim 6 wherein said detector conductor is positioned between said pair of plates.

8. Apparatus for measuring the moisture content of material being conveyed on a conveyor along a generally horizontal path, said apparatus comprising:

a detector conductor adjacent the path of said material on a first side of said conveyor so as to face a first side of said material conveyed on said conveyor;

a first transmitting conductor positioned generally opposite said detector conductor in sufficiently close proximity to said detector conductor so that radio frequency energy can be coupled between said first transmitting conductor and said detector conductor, said first transmitting conductor being adjacent the path of said material on a second side of said conveyor so as to face a second side of material as conveyed on said conveyor;

an additional transmitting conductor positioned adjacent said detector conductor on said first side of said conveyor in sufficiently close proximity to said detector conductor so that radio frequency energy can also be coupled between said additional transmitting conductor and said detector conductor; receiving means;

means for providing a source of radio frequency energy connected between said first transmitting conductor and said additional transmitting conductor whereby coupling between said transmitting conductors and said detector conductor creates a potential in said detector conductor;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

wherein said means for providing a source of radio frequency energy includes first and second output terminals coupled respectively to said first and additional transmitting conductors;

means for connecting said detector conductor to said receiving means for registering said potential of said detector conductor whereby when moisture in said material is disposed in coupling relation between said first transmitting conductor and said detector conductor, the potential of said detector conductor is altered so that moisture can be detected according to the change in potential of said detector conductor;

wherein said means for connecting said detector conductor to said receiving means includes a return path at a reference level intermediate said first and second terminals of said source of high frequency energy;

a signal plate connected to said return path and positioned on the remote side of said detector conductor from said first transmitting conductor; and a grounding plate located on the remote side of said signal plate from said first transmitting conductor.

9. The apparatus according to claim 4 wherein said means for providing a source of radio frequency energy includes first and second output terminals coupled respectively to said first and additional transmitting conductors, and wherein said means for connecting said detector conductor to said receiving means includes a return path at a reference level intermediate said first and second terminals of said source of high frequency energy.

10. The apparatus according to claim 9 further including a signal plate connected to said return path and positioned on the remote side of said detector conductor from said first transmitting conductor.

11. Apparatus for measuring the moisture content of material being conveyed on a conveyor along a generally horizontal path, said apparatus comprising:

a detector conductor adjacent the path of said material on a first side of said conveyor so as to face a first side of said material conveyed on said conveyor;

a first transmitting conductor positioned generally opposite said detector conductor in sufficiently close proximity to said detector conductor so that radio frequency energy can be coupled between said first transmitting conductor and said detector conductor, said first transmitting conductor being adjacent the path of said material on a second side of said conveyor so as to face a second side of material as conveyed on said conveyor, wherein said first transmitting conductor comprises a pair of grounded bars positioned beneath the path of said material;

an additional transmitting conductor positioned adjacent said detector conductor on said first side of said conveyor in sufficiently close proximity to said detector conductor so that radio frequency energy can be coupled between said additional transmitting conductor and said detector conductor, wherein said additional transmitting conductor comprises a pair of plates positioned above the path of said material and wherein said detector conductor is positioned between said pair of plates;

receiving means; means for providing a source of radio frequency energy connected between said first transmitting conductor and said additional transmitting conductor whereby coupling between said transmitting conductors and said detector conductor creates a potential in said detector conductor;

means for connecting said detector conductor to said receiving means for registering said potential of said detector conductor whereby when moisture in said material is disposed in coupling relation between said first transmitting conductor and said detector conductor, the potential of said detector conductor is altered so that moisture can be detected according to the change in potential of said detector conductor; and

further including a grounding plate located above said detector conductor on the remote side of said detector conductor from said first transmitting conductor.

* * * * *

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย
ประวัติผู้เสนอขอรับทุนวิจัย

Name: Wichit Sirichote

Date and Place of Birth: 3 September 1964, Korat Province, North-Eastern of THAILAND

Card ID. 3 1005 01945 35 4

Home address: 15/3 Thanon Tesabal 6 Tambol Sikhiu Amphoe Sikhiu Korat 30140

Education:

1988 M.Sc.(Physics), Chulalongkorn University

1986 B.Sc.(Applied Physics), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Training:

Fifth College on Microprocessors: Technology and Applications in Physics, International Centre for Theoretical Physics Trieste, Italy, 1989

Materials Characterization by Ultrasonic Method, Tohoku National Industrial Research Institute, AIST, Sendai, Japan, 1994

Present Academic Title and Office Address:

Associate Professor of Applied Physics

Department of Applied Physics, Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 THAILAND

Phone: +662 3264339-53 ext.212 Fax: +662 3269981

email: kswichit@kmitl.ac.th

Homepage: Build Your Own Microcontroller Projects URL: www.kmitl.ac.th/~kswichit

Undergraduate Lecture Courses:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Microcontroller and Programming
Real-time Embedded System Design

Postgraduate Lecture Courses:

Designing Computerized Instrumentation
Technology of Photovoltaic System

Master Thesis Supervision:

- 1997 Measuring Mechanical Strength of Cast Iron by Ultrasound PEO Method
- 1998 Low Frequency C-scan Ultrasonic Imaging System
- 1999 I-V Module for Long-term Performance Evaluation of Photovoltaic System
- 2000 Digital Readout Instrument for Platinum Resistance Thermometer
- 2002 Measuring Elastic Properties of Acrylic Plastic by Ultrasound
- 2004 Fabrication of OIML R111 Weights
- 2005 Device for Measuring Total Harmonic Distortion of AC Voltage
- 2007 I-V Curve Tracer for Photovoltaic Array
- 2007 ARM Based Harmonic Meter
- 2009 Digital Power Meter
- 2010 Portable I-V Tracer using Capacitive Load

Field of Interests:

Microprocessors Based Instrumentation
Alternative Energy; Photovoltaic Power Conversion, LED Lighting, Wind Energy

Patent:

1. W.Sirichote, W.Tantraporn, and N.Saengkaew,
"Apparatus and Method for Providing Supplemental Alternating Current from a Solar Cell Array" US Patent 5,898,585 April 27, 1999.
2. W.Sirichote, and S.Manapitakpong,
Apparatus and Method for Measuring Current-Voltage Characteristics of Photovoltaic System*
* Thai patent pending

Research: Utility Backup Photovoltaic Power System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ร่วมวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาว ธนภรณ์ ลีลาวัตตานนท์
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Tanaporn Leelawattananon
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3101500332619
- หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่ เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520
โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 6212
โทรศัพท์มือถือ 089-131-5442
E-mail: ktanapo@kmitl.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2540	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	สจล.กรุงเทพฯ
2548	ปริญญาโท	วท.ม.	วิทยาการสารสนเทศ	สจล.กรุงเทพฯ

- ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนองานวิจัย

5.1 โครงการวิจัยเรื่อง "การหาผลเฉลยเชิงตัวเลขโดยใช้สมการ Gross-Pitaevskii equation สำหรับ

Bose-Einstein condensation (BEC)"

ตำแหน่ง

หัวหน้าโครงการวิจัย

แหล่งทุนสนับสนุน

เงินรายได้ ประจำปี 2553

งบประมาณ 50,000 บาท

ผลงานตีพิมพ์

1. Thanaporn, Leelawattananon and Suphamit-Chittayasothorn , **A Student-oriented**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

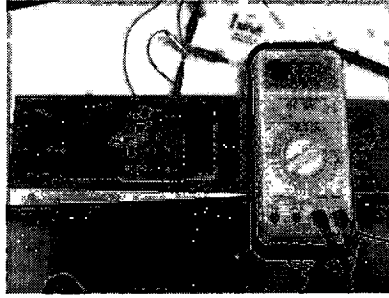
Physics E-tutorial System, Proceedings of the 9th WSEAS International on COMPUTERS

2005, July 11-16, 2005, Vouliagmeni, Athens, Greece. (ผู้วิจัย)

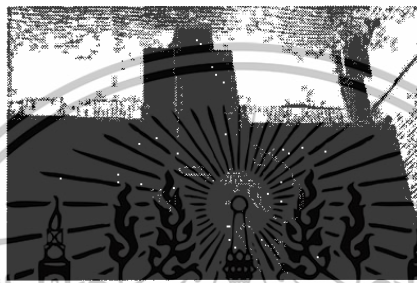
2. Thanaporn, Leelawattananon and Suphamit Chittayasothorn, **The ORM Model as a Knowledge Representation for E-tutorial Systems**, Proceedings of the 6th International Conference on Enterprise Information Systems 2004, vol.2, 2004, pp. 479-484, Feb.12-16, 2004, Porto, Portugal. (ผู้วิจัย)



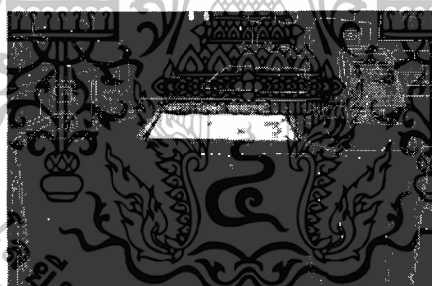
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.19 การวัดค่าความต่างศักย์จากวงจรแบบที่ 2 โดยการสัมผัสกับไม้ที่มีความชื้น



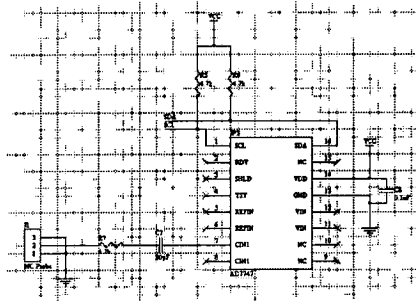
ภาพที่ 3.20 การจัดวางวงจรชุดเซนเซอร์เพื่อวัดค่าความต่างศักย์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง



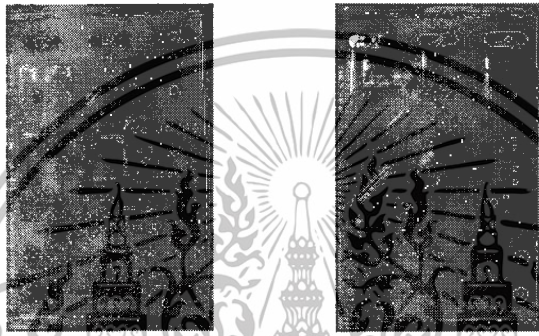
ภาพที่ 3.21 การจัดวางชุดทดลองวัดค่าความต่างศักย์

3.3.6 ออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดค่าแบบที่ 3 ซึ่งเป็นวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้ชิปไอซีสำเร็จรูปในการวัดค่าซึ่งสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าของไม้ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ 2 วงจรแรกเพื่อหาวงจรที่มีความคลาดเคลื่อนของกาวัด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยที่สุด เพื่อนำไปสร้างวงจรถักเซนเซอร์สำหรับออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับสร้างเครื่องวัดความชื้น เลือวงจรภาคเซ็นเซอร์และหัววัดโพรบที่เหมาะสมสำหรับสร้างต้นแบบแผงวงจรพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.22 วงจรภาคเซนเซอร์แบบที่ 3



ภาพที่ 3.23 ด้านหน้าและด้านหลังแผงวงจรวัดความชื้นไม้



ภาพที่ 3.24 แผงวงจรที่ผ่านการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

3.4 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และการประมวลผลสัญญาณ

ในการสร้างเครื่องมือจำเป็นต้องเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ให้แสดงผลข้อความผ่านหน้าจอกราฟฟิกแอลซีดีและเริ่มต้นการติดต่อกับไอซีวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิและความจุไฟฟ้า นำไปแสดงผลบนหน้าจอแสดงผล เมื่อได้ค่าความจุไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ถูกต้องแล้วจึงปรับค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมร่วมกับหัววัดโพรบเพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ต้องการวัดโดยหาจากค่าความชื้นของไม้ที่ต่ำใกล้เคียง 0 เปอร์เซ็นต์และค่าความชื้นของไม้สูงที่สุดซึ่งใกล้เคียง 85 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ปรับเทียบค่ามีความสามารถวัดค่าความชื้นได้ในช่วง 0-85 เปอร์เซ็นต์เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้กับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้เอาผิดเห็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเขียนโปรแกรมเพื่อส่งค่าข้อมูลความจุไฟฟ้าและอุณหภูมิผ่านพอร์ต rs232 และเก็บค่าเพื่อวิเคราะห์ผล

3.5 การทดลองและบันทึกค่า

ในการทดลองใช้คอมพิวเตอร์เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าจากตัวเครื่องโดยใช้ซอฟต์แวร์เก็บบันทึกค่าทุกๆ 60 มิลลิวินาทีจากนั้นทำการประมวลผลข้อมูล โดยใช้การหาค่าเฉลี่ยโดยวิธี moving average , Auto correlation เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนและประมาณค่าที่อ่านได้จากตัวเครื่องโดยทดลองบน โปรแกรมคำนวณ Excel เพื่อให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงค่าที่แท้จริงเพื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของ ความจุไฟฟ้า ความชื้น และอุณหภูมิ ซึ่งในการทดลองบันทึกข้อมูลได้กำหนดเงื่อนไขการวัดค่าของตัวแปรดังนี้

1. วัดค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียสบันทึกความชื้นอากาศขณะทำการวัด
2. วัดค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ โดยกำหนดเงื่อนไขให้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 -55 องศาเซลเซียสและบันทึกค่าความชื้นอากาศขณะทำการวัด
3. วัดค่าความจุไฟฟ้าของไม้แห้ง(ความชื้นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์) โดยกำหนดเงื่อนไขให้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 -55 องศาเซลเซียสและบันทึกค่าความชื้นอากาศขณะทำการวัด
4. วัดค่าความจุไฟฟ้าของไม้ชนิดเดียวกันที่มีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 0-85 เปอร์เซ็นต์ในอุณหภูมิกงที่บันทึกค่าความชื้นอากาศขณะทำการวัด
5. เปลี่ยนชนิดของไม้และวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 0-85 เปอร์เซ็นต์ในอุณหภูมิกงที่(อุณหภูมิห้อง)และบันทึกค่าความชื้นอากาศขณะทำการวัด

เพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จากนั้นบันทึกข้อมูลที่ได้จากตัวเครื่อง วิเคราะห์ข้อมูล หาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าความชื้นรวมถึงผลกระทบจากค่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมขณะทำการวัด ต่อค่าความจุไฟฟ้า นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟและสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความชื้นของไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้