

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเครื่องวัดความชื้นไม้ยางพาราด้วยอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์

Development of Moisture Content Measurement for rubber wood using
Interdigital Electrode.

คณะนักวิจัย

1. รองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. รองศาสตราจารย์ ดร.พกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดินประเภททุนวิจัยเพื่อสร้างนวัตกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2560 รหัสโครงการ ENG601395S

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือของคณะผู้วิจัยและสำนักงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบพระคุณผู้บริหารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทดลองในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตภูมิพาราวัคและเจ้าหน้าที่สำนักงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้อำนวยความสะดวกให้กับคณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นของไม้ยางพาราด้วยวิธีการใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าความจุไฟฟ้าสัมพันธ์กับความชื้นไม้ยางพารา โดยใช้รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยรูปแบบของเซนเซอร์เป็นแบบแผ่นเรียบทำด้วยแผ่น PCB ออกแบบเป็นลายซี่หวี ซึ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างจากรูปแบบเดิมในท้องตลาด เครื่องมือดังกล่าวสามารถวัดความชื้นของไม้ยางพาราได้ในช่วง 6-70% วงจรบริจด์ออกแบบมาเพื่อวัดความจุไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความชื้นของไม้ยางพารามีการเปลี่ยนแปลง ประสิทธิภาพของเครื่องวัดมีค่าความเที่ยงตรง 2% และความแม่นยำ 0.98%

Abstract

A low-cost, repeatability, and linearity interdigital capacitive transducer is proposed with an explanation of experimental results. The probe is in the form of a printed circuit board (PCB) with configuration of two interpenetrating comb electrodes, which is different from the configuration of the moisture content sensors available in the market and literature. The moisture contents of the tested rubber wood samples were in the range of 6-70%. The change in capacitance of sensing probe due to the change of moisture content inside rubber wood was detected by the modified bridge circuit. The performance of this sensor is 2% accuracy error with 0.98% precision error.

บทสรุปผู้บริหาร

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ไม้ยางพาราเป็นที่ต้องการของท้องตลาด ทั้งตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ โดยไม้ยางพาราเป็นวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ของเล่น วัสดุก่อสร้าง และรังใส่ของ เนื่องจากไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีเนื้อค่อนข้างแข็ง น้ำหนักเบา เนื้อไม้มีสีขาวนวล มีลวดลายที่สวยงาม อีกทั้งมีการเพาะปลูกปริมาณมาก และหาได้ง่ายในท้องถิ่น ก่อนการนำไม้ยางพาราไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้นั้นจะต้องผ่านกรรมวิธีต่างๆ หลายขั้นตอน หนึ่งในขั้นตอนการผลิตที่สำคัญคือการอบไม้ยางพารา เนื่องจากไม้ที่เพิ่งตัดใหม่ๆ จะมีความชื้นค่อนข้างมาก รวมถึงการใช้น้ำยารักษาเนื้อไม้ ทำให้มีน้ำในเนื้อไม้มาก เกิดปัญหาการยืดหรือหดตัวของไม้ และเกิดปัญหาการแตกที่ผิวและภายในเนื้อไม้ และการบิดงอ ก่อนที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์จึงต้องผ่านการอบเพื่อให้ไม้มีความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน ในขั้นตอนการอบไม้นั้น จะต้องมีการควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้น เพื่อให้ไม้ยางพารามีคุณภาพตามลักษณะที่ต้องการ

การหาความชื้นไม้ยางพาราด้วยวิธีดั้งเดิมคือการใช้ตุ๋นอบ แล้วหาความแตกต่างระหว่างน้ำหนักไม้ก่อนอบและหลังอบ เทียบกับน้ำหนักไม้หลังการอบแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เวลานาน ไม่สะดวกในการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม จึงได้มีการคิดค้นเครื่องมือวัดความชื้นแบบที่สามารถรายงานผลได้อย่างทันทีทันใด ซึ่งเครื่องมือที่มีขายในท้องตลาด จะเป็นแบบการใช้เครื่องมือวัดความชื้นปักลงบนผิวหน้าไม้ แล้ววัดความชื้นในรูปแบบความต้านทานของเนื้อไม้ ค่าที่ได้จะแสดงผลความชื้นออกมาเป็นแบบดิจิตอล โดยความต้านทานสูงบ่งบอกความชื้นต่ำ ซึ่งเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการนี้มีข้อจำกัดในด้านการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณ โดยเฉพาะในช่วงค่าความชื้นต่ำๆ ที่ทำได้ยาก ทำให้ค่าความชื้นที่ได้มีข้อผิดพลาดสูง และค่าที่ได้นั้นเป็นค่าความชื้นเฉพาะที่จุดของเนื้อไม้ที่ทำการวัดเท่านั้น และการใช้เครื่องมือแบบปักลงในเนื้อไม้ยังเป็นการทำลายเนื้อไม้

โครงการนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาพัฒนาเครื่องวัดความชื้นเนื้อไม้ที่จะสามารถบ่งบอกค่าความชื้นของเนื้อไม้ได้ในภาพรวม โดยการนำแผ่นวงจรพิมพ์ที่กัดเป็นลวดลายต่างๆ มาวางลงบนผิวหน้าของไม้ยางพาราและหาค่าความจุทางไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความชื้น ค่าความชื้นสูงจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าสูง เครื่องมือวัดนี้ลดข้อจำกัดการวัดความชื้นในช่วงค่าความชื้นต่ำๆ เนื่องจากลวดลายที่ออกแบบในแผ่นวงจรพิมพ์ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่ความชื้นต่ำๆ จึงทำให้การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณทำได้ง่ายกว่าการออกแบบหัววัดความจุไฟฟ้าแบบอื่นๆ และเครื่องมือที่ได้ยังมีขนาดกะทัดรัด

สะดวกในการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม โดยในขั้นตอนการทดลอง จะทำการวัดความชื้นในไม้ที่ค่าความชื้นต่างๆ กัน และนำผลที่ได้นั้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความชื้นของเนื้อไม้ โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เครื่องวัดความชื้น ไม้ยี่ห้อพัฒนาขึ้น สามารถแสดงผลความชื้นผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ทำให้เราสามารถทราบค่าความชื้นของเนื้อไม้ยี่ห้อพาราในขณะนั้นได้ สามารถนำไปประยุกต์โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ และการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อให้ได้ไม้ยี่ห้อพาราที่มีคุณภาพตามความต้องการต่อไป



การชุบตัวหลังอบแห้งแล้ว

ดำเนินการแตกแบบรังผึ้ง

รูปที่ 1.1 ผลของไม้ยี่ห้อพาราที่ไม่ได้ควบคุมความชื้น

ที่มา: กลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้, 2554.

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- (1) สามารถหาค่าความชื้นในเนื้อไม้ยี่ห้อพาราได้ โดยวัดในรูปของค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตรงกับความชื้นไม้ยี่ห้อพาราแบบค่าเฉลี่ยของเนื้อไม้
- (2) สามารถออกแบบวงจร ตรวจสอบวัดความชื้นไม้ยี่ห้อพาราได้ และสามารถอธิบายหลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน หรือ ความถี่ได้
- (3) สามารถอธิบายได้ว่ามีปัจจัยหลักอะไรบ้างที่มีผลต่อการวัดความชื้นในไม้ยี่ห้อพารา

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปใช้งานได้ ในอุตสาหกรรมการอบไม้ยี่ห้อพารา เพื่อนำไปวัดค่าความชื้นที่จะต้องควบคุมในกระบวนการก่อนและหลังการอบไม้ยี่ห้อพารา
2. เครื่องวัดความชื้นนั้นจะช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของเนื้อไม้ยี่ห้อพาราได้ ทำให้สะดวกในการนำไปใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไม้ยี่ห้อพารา
3. ได้เครื่องมือวัดค่าความชื้นเป็นแบบค่าเฉลี่ยของเนื้อไม้ซึ่งจากเดิมวัดได้เฉพาะตำแหน่งที่ทำกรวัดแบบจุดบนเนื้อไม้
4. ได้เครื่องมือวัดค่าความชื้นของไม้ยี่ห้อพาราที่ไม่ทำลายเนื้อไม้ซึ่งเครื่องมือวัดความชื้นที่มีใช้กันในปัจจุบันนั้นเป็นแบบที่จะต้องปักลงไปบนเนื้อไม้ซึ่งการปักลงไปจะทำให้ไม้ยี่ห้อพาราไม่มีค่าใช้ได้
5. เครื่องมือวัดความชื้นนั้นลดข้อจำกัดในการวัดความชื้นในช่วงค่าต่างๆ

6. เป็นการลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศและเป็นการสร้างองค์ความรู้ให้เกิดในประเทศ ตามนโยบายการพัฒนาประเทศไทยแลนด์ 4.0

1.4 ขอบเขตของโครงการ

(1) วัดค่าความจุทางไฟฟ้าของเนื้อไม้ยางได้ แล้วนำไปหาความสัมพันธ์เพื่อแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าให้ออกมาเป็นค่าความชื้น

(2) วัดค่าความชื้นเฉลี่ยของไม้ยางพาราได้เฉพาะพื้นที่เท่ากับตัวเซนเซอร์ที่ออกแบบ

(3) วัดค่าความชื้นของไม้ยางพาราได้เฉพาะช่วง ไม่สามารถที่จะวัดได้เต็มช่วงตั้งแต่ 0% ถึง 100%

(4) ไม่คิดผลของอุณหภูมิขณะทำการวัด โดยปัจจัยเรื่องอุณหภูมิจะรวมเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของ เซนเซอร์

สรุป

สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซนเซอร์กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นใน
ยางพารา

ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซนเซอร์กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารา ด้วยเครื่องวัดค่า
LCR โดยวัดซ้ำ 5 ครั้งในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้น พบว่าค่าอิมพีแดนซ์กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารามี
ความสัมพันธ์แบบสมการกำลัง ค่ามุมเฟสกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารามีความสัมพันธ์แบบสมการโพ
ลิโนเมียลกำลังสอง ค่าความต้านทานกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารามีความสัมพันธ์แบบสมการกำลัง
และค่าความจุไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เมื่อพิจารณาเฉพาะค่า
ความจุไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพาราสูงขึ้น โดยค่า
ความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 120 pF ถึง 2,100 pF ในย่านเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารา 11.6% ถึง 71.6% และได้
ค่าความไม่เชิงเส้น 13.06 % และค่าความสามารถในการทำซ้ำ 0.97 %

สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารา

ผลการวัดค่าแรงดันจากการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ ทดลองที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพาราค่า
ต่างๆ และทดลองกับไม้ยางพาราหลายๆ ชิ้นทดลอง และวัดซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละครั้งทดลอง พบว่าค่า
แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารา และแรงดันที่วัดได้มีค่าอยู่ตั้งแต่ 0.3V ถึง
3.85V ในย่านเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารา 11.5% ถึง 74.5% แต่เซนเซอร์มีความสามารถในการวัด
แรงดันได้ตั้งแต่ 0.15V ถึง 4.5V หรือแปลงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพาราได้ค่าอยู่ในช่วง 8.55% ถึง
85% ได้ค่าความไม่เชิงเส้น 11.28 % หรือเปลี่ยนเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะได้ค่าไม่เกิน 8.6 % ค่า
ความไม่แน่นอนในการวัด 0.259 V ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีค่าความสามารถในการทำซ้ำ 0.98 %
หรือคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพาราได้ค่าเป็น 0.75 %

สรุปผลการศึกษาความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยภายนอก

เมื่อนำเซนเซอร์ไปวัดความชื้นในยางพาราที่อุณหภูมิต่างกัน โดยทำการทดลองวัดที่ห้องเย็น
(อุณหภูมิประมาณ 23 องศาเซลเซียส) และทดลองที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อมปกติ (อุณหภูมิประมาณ 32
องศาเซลเซียส) ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์มีความผิดพลาดมากกว่า 10.5 % หรือคิดเป็น
เปอร์เซ็นต์ความชื้นในยางพารา 8.25% และพบว่ากรณีที่วางเซนเซอร์ไม่เรียบสนิทกับไม้ยางพาราทำให้เกิด
ช่องอากาศเข้าไปแทรก ส่งผลให้เซนเซอร์มีความคลาดเคลื่อนไปมากกว่า 35 % หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
ความชื้นในยางพารา 26.76%

การออกแบบ วิธีการใช้งาน และหลักการทำงานของเครื่อง

รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าที่ใช้หลักการ Capacitive Interdigital

ลักษณะของเซนเซอร์สำหรับใช้วัดความชื้นไม้ยางพาราที่อาศัยเทคนิคของการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยหลักการของ Capacitive Interdigital แบบลายซี่หวี ดังรูปที่ 1 โดยรูปแบบของเซนเซอร์ ได้เดินลายเซนเซอร์ลงบนแผ่น PCB ทองแดง การออกแบบเซนเซอร์หรืออิเล็กโทรดตรวจวัดความชื้นไม้ยางพาราที่ได้ ออกแบบไว้ คือ อิเล็กโทรดลายซี่หวี ที่ทำจากแผ่น PCB(Print Circuit Board) โดยมีขนาดความกว้างของซี่หวี 4 มิลลิเมตร ความยาวของซี่หวี 54 มิลลิเมตร ความกว้างของช่องว่าง 1 มิลลิเมตร และมีจำนวนซี่หวี 20 ซี่



รูปที่ 1 ลักษณะของเซนเซอร์

สำหรับการออกแบบ electrode นั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงค่า c ที่วัดออกมาได้ว่ามีค่าที่วัดได้มากน้อยแค่ไหน ซึ่งการออกแบบนี้สำคัญมาก โดยจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่อการวัด

- 1 ความหนาของ electrode ความหนายิ่งมากก็ยิ่งวัดค่าได้สูงขึ้น
- 2 ช่องว่างของ electrode ช่องว่างมากขึ้นจะส่งผลให้วัดค่าได้ไม่ดี (ค่าที่อ่านได้มีค่าต่ำ)
- 3 ความกว้างของ electrode ยิ่งความกว้างของ electrode มากขึ้นก็จะยิ่งวัดค่าได้สูงขึ้น

การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์

สำหรับวงจรที่สามารถนำมาใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าอาศัยเทคนิคในการตรวจวัดได้หลายรูปแบบ เช่น การแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่ การแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นแรงดัน การใช้เทคนิค Switching

Capacitor เป็นต้น สำหรับโครงการนี้ได้เลือกใช้วงจรวัดความถี่ไม่ยุ่งพาราแบบ De sauty's bridge ซึ่งอาศัยเทคนิคการแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นแรงดันไฟฟ้า และมีความเข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน และมีความคล่องตัวสูง

สำหรับการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณได้ประยุกต์ใช้วงจร De sauty's bridge มาใช้ในการวัดความจุไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นค่าแรงดัน โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมด้วยความถี่คงที่ สัญญาณขาออกของวงจรที่ได้จะถูกขยายด้วยออปแอมป์ และจะแปลงไปเป็นสัญญาณกระแสตรงด้วยวงจรกรองเรียงกระแส จากนั้นระดับสัญญาณไฟฟ้าตรงจะถูกส่งเข้าไปยัง ช่องสัญญาณอนาลอกขาเข้าของไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำการประมวลระดับสัญญาณออกมาเป็นค่าความถี่ไม่ยุ่งพารา

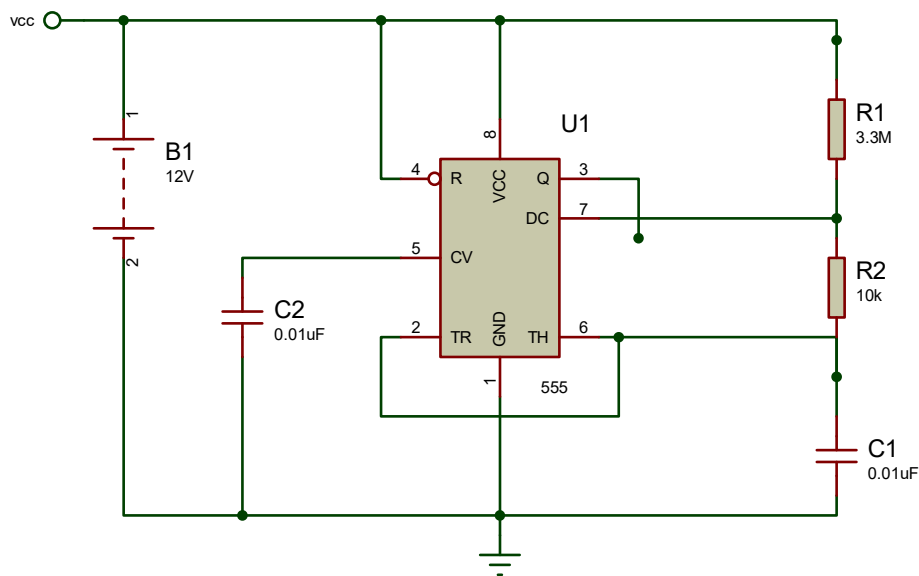
วงจรสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม

ส่วนของวงจรออสซิลเลเตอร์ได้ใช้ ไอซีเบอร์ 555 ทำงานในโหมด Astable ในการสร้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2 โดยค่าความถี่สามารถปรับได้จาก ความต้านทาน R_1 และ R_2 และความจุไฟฟ้า C ดังสมการที่ (3)

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C} \quad (3)$$

สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีค่า Duty Cycle 50% ที่ได้จาก IC 555 สามารถเขียนสมการของสัญญาณในรูปแบบของอนุกรมฟูริเยร์ได้ดังสมการที่ (4)

$$V_{in} = \frac{V_H}{2} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_H}{n\pi} \sin n \frac{2\pi}{T} t \quad (4)$$



รูปที่ 2 วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณสี่เหลี่ยม

การประยุกต์วงจร De sauty's bridge

เมื่อนำวงจร De sauty's bridge มาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำไปวัดค่าความชื้นในไม้ ยางพารา ดังรูปที่ 3 โดยกรณีที่วงจรบริดจ์ไม่สมดุล จะสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด V_o ได้ และสามารถเขียนสมการหาแรงดันที่จุด V_o ได้ดังสมการที่ (5) - (6)

$$V_o = j\omega R_3 V_{in} \left[\frac{R_1 C_1}{R_2} - C_x \right] - \frac{V_{in} R_3}{R_x} \quad (5)$$

$$V_o = j2\pi f R_3 V_{in} \left[\frac{C_1 R_1}{R_2} - C_x \right] - \frac{V_{in} R_3}{R_x} \quad (6)$$

สำหรับที่วงจรบริดจ์สมดุลจะหาค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุดได้จากสมการที่ 7

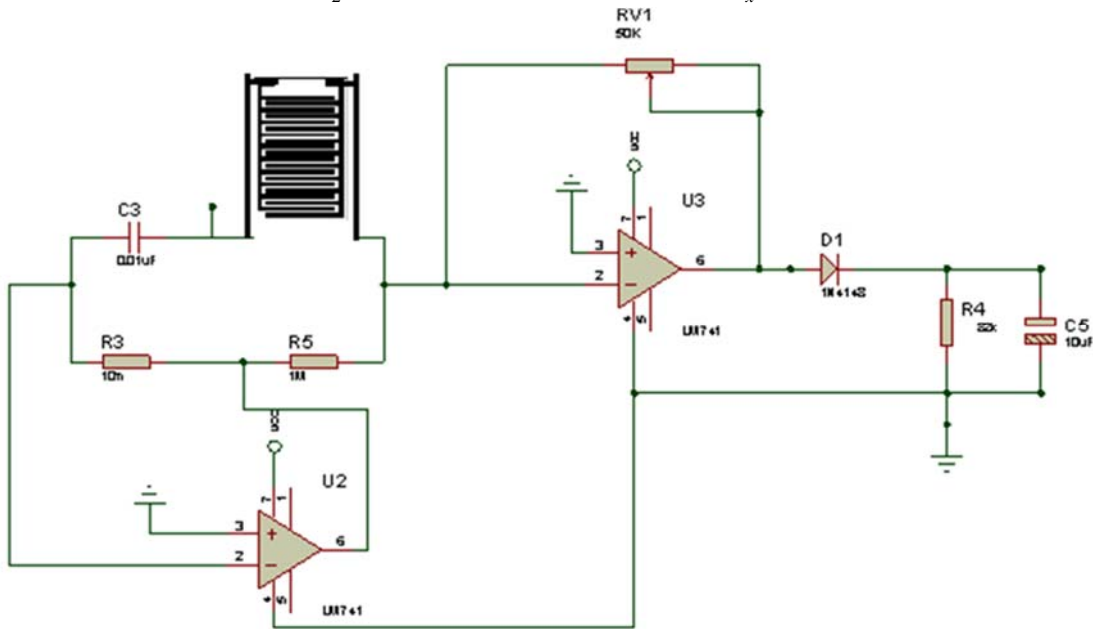
$$C_x = \frac{C_1 R_1}{R_2}, \frac{R_3}{R_x} \approx 0 \quad (7)$$

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรบริดจ์เป็น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 0 ปนอยู่ด้วย ดังนั้น สามารถเขียนแรงดันที่จุด V_o สำหรับฮาร์มอนิกที่ 0 เมื่อใช้วงจรสมมูลของเซนเซอร์เป็นความจุไฟฟ้าขนานกับความต้านทานได้ดังสมการที่ (8)

$$V_o = -\frac{R_3}{R_x} \left(\frac{V_H}{2} \right) \quad (8)$$

สำหรับแรงดันที่ฮาร์มอนิกที่ 1,3,5,...,n สามารถเขียนสมการแรงดันที่จุด V_o ได้ดังสมการที่ (9)

$$V_o = \frac{4fR_3V_H}{n} \left[\frac{C_1 R_1}{R_2} - C_x \right] \cos(2,000\pi nt) + \frac{2V_H}{n\pi} \left(\frac{R_3}{R_x} \right) \cos(2,000\pi nt + 90^\circ) \quad (9)$$



รูปที่ 3 วงจรที่ใช้สำหรับเครื่องวัดความชื้นในไม้ยางพารา

เครื่องวัดความชื้นไม้ยางพารา

เครื่องวัดความชื้น โดยนำเซนเซอร์หรืออิเล็กทรอนิกส์ตรวจสอบวัดความชื้นไม้ยางพาราที่ได้ออกแบบเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบซีพียูต่อเข้ากับวงจร De sauty's bridge โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณสี่เหลี่ยมในการจ่ายค่าความถี่ 1 KHz แล้วทำการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Wemos D1 แสดงผลบนจอ OLED ปุ่มสำหรับการเปิด ปิดเครื่องและที่ชาร์จแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องวัดความชื้นไม้ยางพารา

เมื่อทำการเปิดเครื่องที่ปุ่มเปิดปิด หน้าจอ OLED บนเครื่องวัดความชื้นไม้ยางพาราจะแสดงข้อความ ดังรูปที่ 5 เพื่อเป็นการปรับเครื่องวัดให้พร้อมที่จะทำการวัด และเมื่อพร้อมที่จะทำการวัดหน้าจอจะแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 เมื่อเปิดเครื่องวัดความชื้น ไม้ยางพารา



รูปที่ 6 เครื่องวัดความชื้นที่พร้อมจะทำการวัด

เมื่อนำเครื่องวัดไม้ความชื้นไม้ยางพาราไปวางทาบบนไม้ที่ต้องการจะวัด หน้าจอแสดงผลของเครื่องมือจะแสดงค่าที่อ่านได้ เมื่อค่าที่อ่านได้เป็นค่าที่มีความชื้นน้อยจะแสดงดังรูปที่ 7 โดยมีข้อความ LOW กำกับเสมอ ส่วนหากอ่านค่าความชื้นได้ค่ามากแสดงดังรูปที่ 8 ข้อความ HIGH ปรากฏขึ้น

หมายเหตุ ความชื้นที่ใช้กันในโรงงานเมื่อมีค่ามากกว่า 14 % จะเป็นค่าความชื้นที่มาก ต้องทำการอบใหม่เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 7 ค่าความชื้นที่อ่านได้ค่าต่ำ



รูปที่ 8 ค่าความชื้นที่อ่านได้ค่าสูง

ภาคผนวก

สำเนาบทความที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว (Quartiles Q₁ IF =2.2)

สำเนาคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

ปัญหาและข้อที่จะพัฒนาต่อไป

เนื่องจากค่าที่วัดได้เป็นการสอบเทียบกับการวัดด้วยวิธีอบแห้ง เมื่อมีการใช้ไปนานๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในวงจรอาจมีความผิดเพี้ยนไปได้บ้างอันเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงต้องสอบเทียบใหม่ทุกครั้งทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดใหม่ได้ ซึ่งเป็นอุปสรรคเรื่องความไม่เสถียรของวงจรดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาต่อดังนี้

1. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการวัดความชื้นในถังพาราของเซนเซอร์ เนื่องจากในการทดลองยังไม่ได้หาความสัมพันธ์ จากการวัดความชื้นในถังพาราที่อุณหภูมิแตกต่างกันอย่างชัดเจน

2. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการวัดความชื้นในถังพาราหลายๆ ชนิด เพื่อให้เซนเซอร์มีความสามารถในการแยกแยะชนิดในถังพาราได้อย่างอัตโนมัติ ทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ขนาดของไม้ที่แตกต่างกันและมีความหนาแน่นที่ต่างกันย่อมส่งผลกับ *calibration curve* ของเครื่องมือด้วยทำให้มีผลผิดพลาดที่วัดได้

3. การสร้างเซนเซอร์แบบแผ่นเรียบวางราบบนผิวไม้ถังพารา มีผลในเรื่องของช่องอากาศเนื่องจากการวางราบไม่เรียบพอ จึงต้องมีแรงกดเซนเซอร์เพื่อให้แนบสนิทกับไม้ที่สุด ดังนั้นต้องมีการออกแบบสิ่งที่ใช้เป็นแรงกดเพื่อให้แรงกดสามารถส่งผ่านไปทั่วทั้งแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเดิมโครงการนี้ได้กำหนดจุดที่ต้องใช้นิวโปกกลงไปบนเซนเซอร์สองจุด ซึ่งแรงกดอาจไม่สามารถส่งผ่านไปทั่วทั้งแผ่นอิเล็กทรอนิกส์

นอกจากนี้ปัญหาอีกปัญหาหนึ่งคือเมื่อแบตเตอรี่ของเครื่องลดลงส่งผลให้ค่าที่วัดได้ลดลงด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาในส่วนของการออกแบบวงจรคงค่าระดับแรงดันที่จ่ายให้ระบบด้วย