การศึกษาการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงขี้เลื่อยไม้ที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำทางกายภาพและเคมี

A Study of Chemical Release of Wood/PVC Composites Affecting on the Physical and Chemical Water Qualities

โดย

ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล

ดร.ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

นางสาววรนุช ดีละมัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๗ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปลดปล่อยสารเคมีของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ (WPVC) ที่มีผลต่อคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมี ชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ในอัตราส่วนของพีวีซีและผงไม้ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ สภาวะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบแช่ชิ้นงานถูกปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ 30-70 องศาเซลเซียส และเวลาในการแช่ชิ้นงาน 0-120 ชั่วโมง และทำการประเมินคุณภาพของน้ำโดยการวัดค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความขุ่น และสีของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีชิ้นงานพีวีซี จากผลการทดลองพบว่า ค่า pH ของน้ำมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำไม่มีผลต่อค่า pH ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงาน หรืออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นกรณีของการแช่ชิ้นงาน WPVC ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการยึดเกาะระหว่างเฟสที่อ่อนแอระหว่างพีวีซีและไม้ จึงทำให้ไอออนโลหะที่มาจากสารเติมแต่งของพีวีซีหลุดออกมาได้ง่ายขึ้น ความขุ่นและสีของน้ำกรณี WPVC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานหรืออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณีพีวีซีไม่พบการเปลี่ยนแปลง จากผลตรวจสอบคุณภาพน้ำ มันชี้ให้เห็นว่าการใช้งาน WPVC ซึ่งต้องสัมผัสกับน้ำสามารถทำได้อย่างปลอดภัย ทั้งนี้เป็นเพราะคุณภาพของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำทิ้งจากกรมควบคุมมลพิษ

คำสำคัญ: วัสดุผสม/พอลิไวนิลคลอไรด์/เส้นใยธรรมชาติ/คุณภาพน้ำ/อุณหภูมิการใช้งาน

Abstract

This research work was to study the chemical release of wood/polyvinylchloride composites (WPVC) affecting the physical and chemical properties of water. WPVC specimens in ratio of PVC and wood (100:100 by weight) were prepared by using twin screw extruder. The water conditions for specimen immersion testing were varied for temperatures of 30-70 $^{\circ}$C and specimen immersion time of 0-120 h. The water quality was estimated by measuring pH, electrical conductivity, turbidity and color of water after immersion of WPVC specimen as comparing with case of PVC specimen. The result suggested that pH values of water slightly decreased with increasing specimen immersion time whereas the change of temperature of water did not affect the pH value. The electrical conductivity remained unchanged with increasing specimen immersion time or temperature except for immersion of WPVC specimens at 70 $^{\circ}$C. This might be attributed the weak interfacial bonds between PVC and wood and this led to more easily release the metal ions from additives of PVC. The turbidity and color of water for case of WPVC increased with increasing specimen immersion time whereas those for case of PVC did not change. From the results of water quality testing, it indicated that WPVC applications which contact with water are safety. This was because water quality after immersion of WPVC specimen is within the effluent standards of pollution control department.

Keywords: Composite/Polyvinyl chloride/Natural fiber/Water qualities/Application temperature

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนุบสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้ทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 และขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์ และสาขาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์เคมี

คณะวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บัญชีตาราง	จ
บัญชีรูป	ฉ
บทที่	
1. บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 พีวีซี	4
2.2 เส้นใยธรรมชาติ	8
2.3 วัสดุผสม	10
2.4 สารรมยา	14
2.5 คุณภาพของน้ำ	14
2.6 ประเภทของน้ำเสีย	17
2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	19
3. วิธีดำเนินการวิจัย	**21****4**
3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปและเตรียมชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC	22
3.2 ขั้นตอนการจำลองสภาวะการใช้งาน	24
3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพน้ำ	25
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	27
4.1 ค่า pH	27
4.2 ค่าการนำไฟฟ้า	29
4.3 ค่าความขุ่นของน้ำ	31
4.4 ลักษณะสีของน้ำ	33
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	35
เอกสารอ้างอิง	36

บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แผนงานกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และผลการดำเนินงาน	2
2	รายละเอียดของพีวีซีและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานพีวีซีและWPVC	22
3	ลักษณะสีของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กัน	33

บัญชีรูป

รูปที่		หน้า
1	จุดบกพร่องที่เกิดจากโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ในสายโซ่พีวีซี	6
2	กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรคลอริเนชันที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างที่ผิดปกติของพีวีซี	7
3	การเสื่อมสภาพของพีวีซีที่เกิดชึ้นแบบสุ่มที่พบในสายโซ่พีวีซีแบบปกติ	7
4	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	8
5	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	9
6	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	9
7	มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น	12
8	ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส	13
9	แผนการดำเนินงานวิจัยการศึกษาการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำทางกายภาพและทางเคมี	21
10	เครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง	22
11	เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่	23
12	ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีด	23
13	ชิ้นงานทดสอบ	24
14	การจำลองสภาวะการใช้งานโดยการใช้ตู้อบ	24
15	การวัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำด้วยเครื่อง pH meter รุ่น HACH HQ40d	25
16	การวัดค่าความขุ่นของน้ำด้วยเครื่อง turbidimeter รุ่น HACH 2100Q	25
17	ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ที่มีต่อค่า pH ของน้ำ ณ อุณหภูมิของน้ำ 30 องศาเซลเซียส	27
18	ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ที่มีต่อค่า pH ของน้ำ ณ อุณหภูมิของน้ำ 70 องศาเซลเซียส	28
19	ผลของเวลาและอุณหภูมิในแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ที่มีต่อค่า pH ของน้ำ	29
20	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน	29
21	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน	30
22	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน	31
23	ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และWPVC ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน	32
24	ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และWPVC ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน	32
25	ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และWPVC ที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน	33

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันวัสดุผสมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติ (Wood/Plastic composites หรือ WPC) เริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นในการนำมาใช้งานทดแทนการใช้ไม้จริง เนื่องจากปริมาณไม้ตามธรรมชาติมีจำนวนลดลงอย่างมากจากการลักลอบตัดไม้ทำลาย ประกอบกับปริมาณไม้ที่มีอยู่น้อยส่งผลทำให้ไม้มีราคาค่อนข้างสูง WPC เป็นวัสดุผสมที่ได้จากการนำพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติก เช่น พอลิเอทธิลีน พอลิพรอพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี เป็นต้น [1-5] มาผสมกับเส้นใยธรรมชาติ เช่น ผงไม้ เส้นใยปาล์ม ป่าน ศรนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าว เป็นต้น ด้วยกระบวนการขึ้นรูปทางพอลิเมอร์ ส่วนรูปแบบการนำผลิตภัณฑ์ WPC มาใช้งาน พบว่า ได้มีการนำมาใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย อาทิเช่น ระแนง วงกบประตู เก้าอี้สนาม สะพานภายในสวน ไม้ปูพื้นที่ใช้ภายในและภายนอกอาคาร เป็นต้น ซึ่งการนำไปใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้งานกลางแจ้งต้องเผชิญกับแสงแดด ความร้อน และความชื้นซึ่งอาจมีผลทำให้สารเติมแต่งของพอลิเมอร์ และสารเคมีที่มีหลงเหลืออยู่ในเส้นใยธรรมชาติที่มาจากการรมยาไม้อาจถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อนำชิ้นงาน WPC ไปใช้งานกลางแจ้ง

วัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ (Wood/polyvinylchloride composites หรือ WPVC) เป็นหนึ่งในวัสดุ WPC ที่ถูกนำมาใช้งานค่อนข้างมาก เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่แข็งแรง และทนทานต่อสารเคมีได้ดี [1] จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุตกแต่ง วัสดุก่อสร้างที่ต้องใช้งานกลางแจ้ง นอกจากนี้การที่ WPVC มีพีวีซีเป็นองค์ประกอบมีผลทำให้มีสมบัติการลามไฟที่ต่ำซึ่งเป็นผลมาจากอะตอมของคลอรีนในโครงสร้างพีวีซี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา WPVC มีอยู่หลากหลายด้านซึ่งมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกล [1, 5-10] เช่น ผลของชนิดและปริมาณของเส้นใยธรรมชาติ สารเติมแต่ง การปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นต้น จากการสืบค้นข้อมูลไม่พบงานวิจัยเกี่ยวกับการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุ WPC ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมทั้งกรณีเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเอทธิลีน พอลิพรอพิลีน และพีวีซี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีพีวีซีซึ่งมีการเติมสารเติมแต่งเป็นจำนวนมาก เช่น สารหล่อลื่นภายใน สารหล่อลื่นภายนอก สารช่วยในการขึ้นรูป สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน สารเพิ่มเนื้อ เป็นต้น ดังนั้นการนำวัสดุ WPVC ไปใช้งานต้องคำนึงถึงสมบัติทางด้านการรับแรงแล้ว ยังควรที่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบของการนำชิ้นงาน WPVC ไปใช้งานที่มีต่อสภาวะแวดล้อมธรรมชาติด้วย และเพื่อเป็นข้อมูลให้ผู้ประกอบการที่ผลิตชิ้นงานวัสดุ WPVC ในประเทศนำมาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงสูตรส่วนผสมเพื่อไม่ให้การนำชิ้นงาน WPVC ไปใช้งานแล้วมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันเป็นการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางการค้ากับต่างประเทศซึ่งให้ความสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก

โครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายในการศึกษาผลกระทบของการใช้งานวัสดุ WPVC ภายใต้สภาวะกลางแจ้งในแง่ของการปลดปล่อยสารเคมีจากวัสดุ WPVC ที่ผลต่อคุณภาพของน้ำ โดยทำการศึกษาภายใต้สภาวะจำลองที่มีอุณหภูมิของน้ำแตกต่างกันเพื่อเป็นการเร่งสภาวะ และทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกับกรณีของพีวีซี การประเมินคุณภาพของน้ำทางกายภาพและทางเคมีดำเนินการโดยการวัดค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความขุ่นของน้ำซึ่งอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากการหลุดออกของสารเติมแต่งในวัสดุ WPVC และการสลายตัวของพีวีซี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาความเป็นไปได้ของการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ที่มีต่อคุณภาพของน้ำทางกายภาพ และทางเคมี

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์
ทราบถึงผลของการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ที่มีต่อค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความขุ่นของน้ำ	ศึกษาความเป็นไปได้ของการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ที่มีต่อคุณภาพของน้ำทางกายภาพ และทางเคมี

ตารางที่ 1 แผนงานกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และผลการดำเนินงาน

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	คิดเป็น
1. เตรียมชิ้นงานวัสดุผสม WPVC	• ขึ้นรูปวัสดุผสม WPVC อัตราส่วนพีวีซี:ผงไม้ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก และพีวีซี • เตรียมชิ้นงานทดสอบ	• ได้ชิ้นงานวัสดุผสม WPVC และพีวีซี • ได้ชิ้นงานทดสอบ WPVC และพีวีซี	100%
2. ทำการจำลองสภาวะการใช้งานของชิ้นงาน WPVC	• การทดสอบการจำลองสภาวะการใช้งานของชิ้นงานทดสอบในน้ำโดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ	• ได้ทำการทดสอบจำลองสภาวะการใช้งานของชิ้นงาน WPVC และพีวีซี โดยการแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำ ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส	100%
3. ตรวจสอบคุณภาพของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC	• ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC และพีวีซี	• ได้ผลของค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC และพีวีซี	100%
4. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง	• การวิเคราะห์ผลของการปลดปล่อยสารเคมีจากชิ้นงาน WPVC และพีวีซีที่มีต่อคุณภาพน้ำ	• ได้ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยของสารเคมีจากชิ้นงาน WPVC และพีวีซีที่มีต่อคุณภาพน้ำ	100%
5. สรุปผลและรายงานผลการดำเนินงาน	• สรุปผลการทดลอง และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	• ได้ข้อสรุปผลการทดลอง และรายงานฉบับสมบูรณ์	100%

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 วัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ที่นำมาทำการศึกษาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยใช้พีวีซีชนิดแข็ง เกรดอัดรีด และมีอัตราส่วนพีวีซีและผงไม้ คือ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก

1.3.2 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ในน้ำ มีดังนี้

- อุณหภูมิของน้ำ อยู่ในช่วง 30 – 70 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการแช่ชิ้นงานวัสดุผสม คือ 0 – 120 ชั่วโมง

1.3.3 สมบัติของน้ำที่ทำการทดสอบ มีดังนี้

- ความขุ่น
- ความเป็นกรด-เบส
- สมบัติการนำไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลกระทบของการนำชิ้นงาน WPVC ไปใช้งานที่มีต่อสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมให้ผู้ประกอบการตระหนักถึงผลดังกล่าว และหาแนวทางป้องกัน ซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการแข่งขันทางการค้ากับต่างประเทศ

1.4.2 เผยแพร่ผลงานวิจัยโดยการนำเสนอผลงานในการจัดนิทรรศการต่างๆ ที่มีภาคเอกชนเข้าร่วม

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พีวีซี (poly(vinyl chloride), PVC)

พีวีซีหรือพอลิไวนิลคลอไรด์จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีสมบัติอยู่ในช่วงกว้างซึ่งขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งที่ประกอบอยู่ในสูตรของสารคอมปาวด์ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พีวีซีสามารถถูกนำ ไปใช้งานได้ในรูปแบบที่หลากหลาย

สูตรโครงสร้างทางเคมีของพีวีซี คือ $[\ CH_2\text{-}\underset{\underset{Cl}{|}}{CH}\ ]_n$

<u>สารเติมแต่งของพีวีซี</u> [11-13]

สารเติมแต่งมีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซี เนื่องจากผลิตภัณฑ์พีวีซีสามารถผลิตให้มีสมบัติที่หลากหลายได้ สามารถผลิตเป็นวัสดุที่มีความแข็งหรืออ่อนนิ่มได้ ขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่เลือกใช้ นอกจากนี้พีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ดังนั้นในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพและสารหล่อลื่น

1. สารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant)

สารหล่อลื่นภายในเป็นสารหล่อลื่นที่สามารถผสมเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง (viscosity reduction) ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการไหลดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์ลงด้วยซึ่งมีผลทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีในระหว่างการได้รับแรงเฉือนมีลดลง(reduction of heat dissipation) แต่สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ (heat distortion temperature) ลดต่ำลงด้วย ดังนั้นในการเติมสารหล่อลื่นจึงควรเติมในปริมาณน้อยๆ (โดยทั่วไปประมาณ 0.3-3 %) สารหล่อลื่นภายในของพีวีซี เช่น fatty acid esters, glycerol esters ส่วน fatty acid salt โดยเฉพาะ calcium stearate สามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก

2. สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant)

สารหล่อลื่นภายนอกเป็นสารหล่อลื่นที่ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (friction-reducing effect) ช่วยลดการเกิดความร้อนที่มากเกินไป การเกิดเป็นฟิล์มของสารหล่อลื่นขึ้นระหว่างพื้นผิวโลหะและพอลิเมอร์ช่วยลดการเกาะติดระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (release effect) และยังช่วยป้องกันการเกิดการเสียรูปของพอลิเมอร์หลอม (prevention of melt fracture) เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นมีผลทำให้อัตราการเลื่อนผ่านผนังโลหะของพอลิเมอร์ (wall slippage) มีเพิ่มมากขึ้น และต้านการเกาะติดของพอลิเมอร์ที่ผนัง (stick-slip effect) สารหล่อลื่นภายนอกของพีวีซีเช่น paraffin wax, polyethylene wax เป็นต้น

3. สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizer)

สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันหรือหน่วงให้เกิดช้าลง โดยสารเพิ่มเสถียรภาพเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชัน หรือการดูแลเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซีโดยสารเพิ่มเสถียรภาพเข้าไปทำปฏิกิริยากับพอลิอีนทำให้ความยาวของพอลิอีนสั้นลง สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซี ได้แก่สารประกอบ

ตะกั่ว สารประกอบดีบุก แคดเมี่ยม แบเรี่ยม เช่น tribasic lead sulphate, calcium stearate, zinc stearate เป็นต้น

4. สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงยูวี (UV stabiliser)

แสงยูวีเป็นองค์ประกอบหนึ่งของแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลก แสงยูวีมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280-400 nm ซึ่งแสงยูวีเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้พีวีซีเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (photodegradation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 310-320 nm ดังนั้นการนำพีวีซีไปใช้งานกลางแจ้งอาจต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงลงไปด้วย สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงที่ใช้กับพีวีซี แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ สารดูดซับแสงยูวีประเภทสารอินทรีย์ (organic UV absorber) สารกรองแสงยูวีประเภทสารอนินทรีย์ (inorganic UV-screening agent) และสารที่ทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระ (free-radical scavengers)

5. สารช่วยขึ้นรูป (processing aids)

สารช่วยขึ้นรูปส่วนใหญ่ถูกใช้ในพีวีซีชนิดแข็งเป็นหลัก สารช่วยขึ้นรูปมีหน้าที่ช่วยทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปมีมากขึ้น โดยมีส่วนช่วยทำให้พีวีซีสามารถหลอมตัวได้ง่ายขึ้น มีอัตราการผลิตที่เร็วขึ้น พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยขึ้นรูปของพีวีซี เช่น สารช่วยขึ้นรูปพวกอะคริลิก ABS SAN copolymer

6. สารปรับปรุงแรงกระแทก (impact modifier)

สารปรับปรุงแรงกระแทกมีหน้าที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ทำให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงกระแทกของพีวีซีถูกปรับให้ดีขึ้นโดยการเติมยางลงไปซึ่งยางที่เติมลงไปนั้นไม่สามารถเข้ากันได้กับพีวีซีเมทริกซ์ จึงพบว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเป็นสองเฟส เมื่อวัสดุได้รับแรงกระแทกในช่วงแรกเมทริกซ์จะดูดซับแรงเอาไว้หลังจากนั้นจึงส่งผ่านแรงไปยังเฟสของยาง ยางทำหน้าที่ดูดซับพลังงานการกระแทกเอาไว้ทำให้วัสดุไม่เกิดการแตกหักแบบเปราะ

7. สารเพิ่มเนื้อ (filler)

สารเพิ่มเนื้อเป็นสารเติมแต่งที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีความแตกต่างจากเมทริกซ์ทั้งในด้านองค์ประกอบและโครงสร้าง สารเพิ่มเนื้อส่วนใหญ่เป็นพวกสารอนินทรีย์ สารเพิ่มเนื้อถูกเติมลงในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อและลดต้นทุน นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์อีกด้วย สารเพิ่มเนื้อที่นิยมใช้ในพีวีซี คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, $CaCO_3$) เป็นสารเพิ่มเนื้อที่มีความสมดุลระหว่างราคาถูก และยังคงสมบัติทางกลและทางกายภาพของพีวีซีเอาไว้ แคลเซียมคาร์บอเนตมีแหล่งกำเนิดมาจากซากของสัตว์หรือเปลือกหอยในทะเลที่มาทับถมกัน ชอล์ก (chalk) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในพีวีซีมากที่สุด ซึ่งชอล์กประกอบด้วยผลึกของหินปูนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างหลวมๆ แคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อสมบัติของพีวีซีหลายประการ เช่น ปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทก ทำ ให้ผิวชิ้นงานมีความมันเงามากขึ้น มีความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาดมากขึ้น ความทนแรงดึงสูงขึ้น ค่ามอดุลัสของอิลาสติกสูงขึ้น เป็นต้น

<u>การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซี</u> [11, 14-15]

ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโดยปกติแล้วพีวีซีนั้นไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน เนื่องจากพลังงานจำเพาะ (specific energy) ที่ใช้ในการทำให้พีวีซีหลอมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันมีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ที่ใช้ในการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซี ซึ่งมีค่าประมาณ 20 กิโลแคลลอรี่ต่อโมล

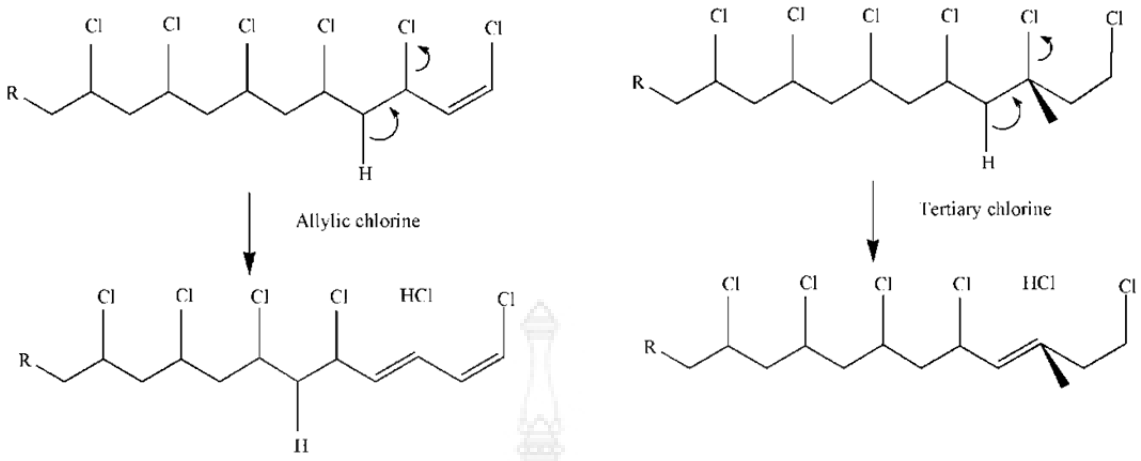
และ 25.9 กิโลแคลลอรีต่อโมล ด้วยเหตุนี้ในการขึ้นรูปพีวีซีจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงในพีวีซีด้วย

การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชัน (Dehydrochlorination reaction)

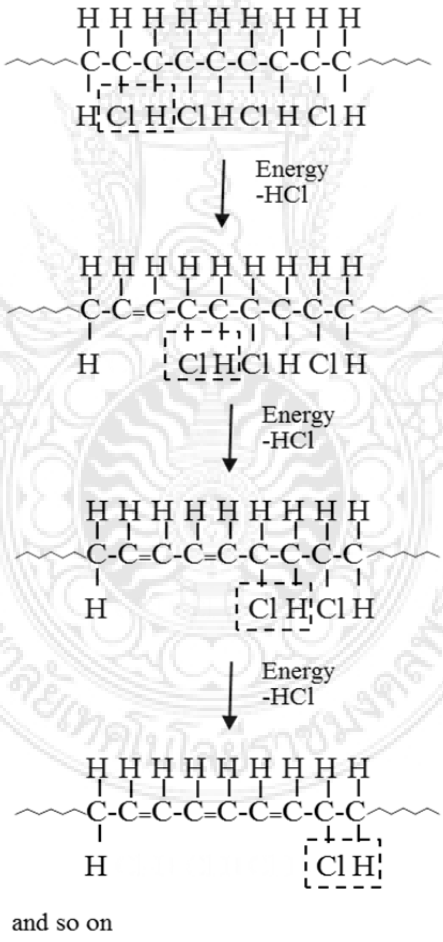
เป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิสูงปานกลาง (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริกขึ้น กรดไฮโดรคลอริกมีผลทำให้ปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันเกิดเร็วขึ้น คือ มันทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (auto-catalyst) เช่นเดียวกับกรดตัวอื่นๆ พีวีซีมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำมีสาเหตุมาจากโครงสร้างที่ผิดปกติในพอลิเมอร์ซึ่งพวกมันทำหน้าที่กระตุ้นให้พันธะระหว่างคลอรีนและคาร์บอนสร้างโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ (labile structure) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการดีไฮโดรคลอริเนชัน โครงสร้างที่ผิดปกติ เช่น ส่วนที่เหลือจากตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปลายสายโซ่ที่มีพันธะไม่อิ่มตัว พันธะไม่อิ่มตัวภายในสายโซ่ กิ่งก้านของสายโซ่ โครงสร้างที่ต่อกันแบบหัวต่อหัว และโครงสร้างที่เกิดออกซิเดชัน เป็นต้น โครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดดีไฮโดรคลอริเนชัน มีโครงสร้างดัง**รูปที่ 1** คือ คลอรีนที่ทำพันธะกับคาร์บอนที่เป็นส่วนของกิ่ง (tertiary chlorine) ประมาณ 70-80 % และกรณีคลอรีนที่อยู่ใกล้ตำแหน่งของพันธะคู่ภายในสายโซ่ (internal allylic chlorine) อีกประมาณ 10-15 % การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันที่เกิดจากโครงสร้างที่ผิดปกติเหล่านี้มีขั้นตอนการเกิดดัง**รูปที่ 2** อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันเริ่มต้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของโครงสร้างที่มีความผิดปกติ ส่วนกรณีที่โมโนเมอร์ต่อกันด้วยรูปแบบปกติการเกิดดีไฮโดรคลอริเนชันเริ่มต้นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งโดยเกิดขึ้นในแบบสุ่ม (random) พันธะคู่แบบ conjugated หรือ polyene sequence ถูกสร้างขึ้นภายในสายโซ่ของพีวีซีขณะที่อะตอมของไฮโดรเจนและคลอรีนหลุดออกจากสายโซ่ หรือเรียกว่า unzipped ผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปถูกแสดงใน**รูปที่ 3**

(a) (b)

รูปที่ 1 จุดบกพร่องที่เกิดจากโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ในสายโซ่พีวีซี [15]
(a) Internal allylic chloride
(b) tertiary chloride



รูปที่ 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรคลอริเนชันที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างที่ผิดปกติของพีวีซี [14]



รูปที่ 3 การเสื่อมสภาพของพีวีซีที่เกิดชิ้นแบบสุ่มที่พบในสายโซ่พีวีซีแบบปกติ [14]

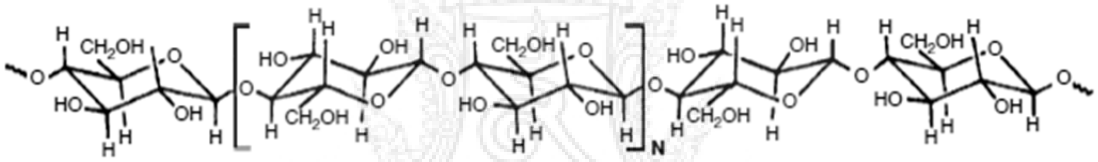
2.2 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ในปริมาณมาก คือ ไม้ ไม้ถูกจัดว่าเป็นพวกวัสดุผสม (composite) ประเภทพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) สารสกัดและเถ้า โดยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของโครงสร้าง เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของเมทริกซ์แทรกอยู่ระหว่างไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (cellulose microfibrils) ส่วนลิกนินนั้นถือเป็นส่วนของเปลือกด้านนอกทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง

<u>องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ</u> [16-19]

1. เซลลูโลส (Cellulose)

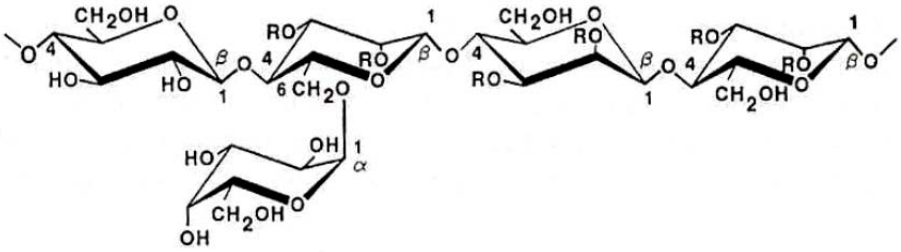
องค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ไม้ คือ เซลลูโลส โดยมีอยู่ประมาณ 40-50 % ในไม้แห้ง เซลลูโลสเป็นพวกโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยหน่วยของ β-D-gluccopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4-β-glucosidic bonds ดังแสดงใน**รูปที่ 4** เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีแรงดึงดูดระหว่างกันทั้งภายในและภายนอกที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง การรวมตัวเป็นกลุ่มของโมเลกุลเซลลูโลสเกิดเป็นไมโครไฟบริล (microfibrils) และไมโครไฟบริลรวมตัวกันเป็นไฟบริล (fibril) และในท้ายที่สุดได้เป็นเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลสส่งผลทำให้เซลลูโลสมีสมบัติความทนแรงดึงที่แข็งแรงและทนต่อตัวทำละลายได้ดี



รูปที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [19]

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

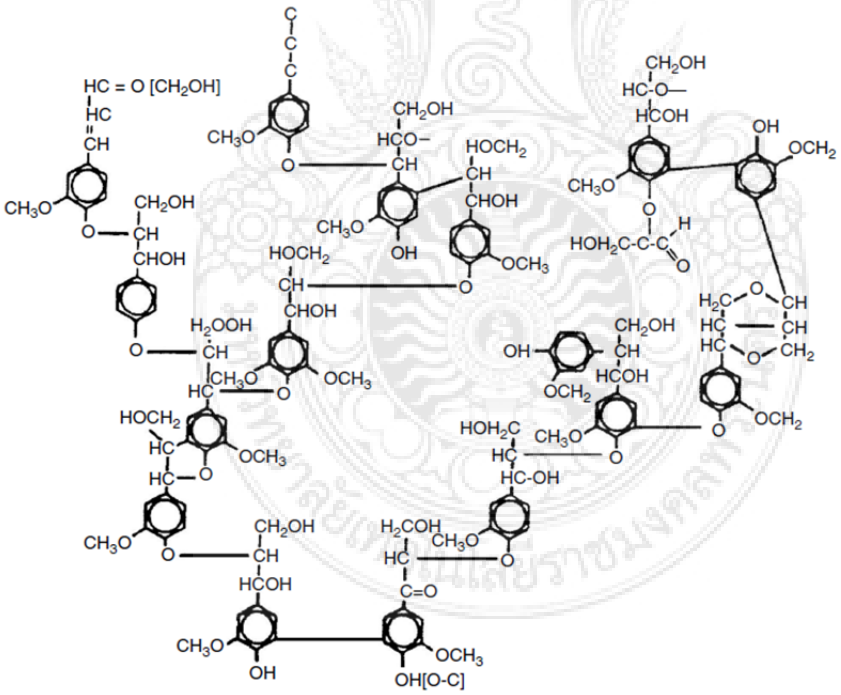
เฮมิเซลลูโลสจัดอยู่ในกลุ่มของเฮทเทอร์โรพอลิแซคคาไรด์ (heteropolysaccharides) แบบอสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่ง เฮมิเซลลูโลสมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 20-30 % เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย ส่วนของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรดได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น D-glucose D-galactose D-xylose L-arabose เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ประการแรก คือ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดแต่เซลลูโลสมีเพียง 1,4-β-D-gluccopyranose เชื่อมต่อกันเท่านั้น ประการที่สอง คือ ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านในขณะที่เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ส่วนประการที่สาม คือ องศาการเกิดพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลสโดยธรรมชาติแล้วมีค่ามากกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10 ถึง 100 เท่า เฮมิเซลลูโลสส่วนมากมีองศาการเกิดพอลิเมอไรเซชันประมาณ 200 เท่านั้น ในไม้สามารถมีเฮมิเซลลูโลสที่มีส่วนประกอบในโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ เช่น ในไม้เนื้ออ่อนมีเฮมิเซลลูโลส ชนิด galactoglucomannans อยู่ประมาณ 20 % และมี Arabinoglucuronoxylan ประมาณ 5-10 % เป็นต้น **รูปที่ 5** เป็นตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 5 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [16]

3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อน แบบอสัณฐาน ซึ่งมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมากและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ภายในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของอะลิฟาติก (aliphatic) และอะโรมาติก (aromatic) โมโนเมอร์ของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) สมบัติเชิงกลของลิกนินมีค่าต่ำกว่าของเซลลูโลส ลิกนินมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 18-30 % โดยน้ำหนัก โดยส่วนใหญ่ไม้มีลิกนินอยู่ที่ชั้นผิวของผนังเซลล์ เนื่องจากไม้มีปริมาณของลิกนินอยู่มากกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ ที่มาจากพืชจึงทำให้ไม้มีความแข็งสูง ลิกนินสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ลิกเนส (lignase) หรือลิกนินเนส (ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน ดังแสดงใน**รูปที่ 6**



รูปที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [19]

4. สารสกัดและเถ้า (Extractives and Ash)

ปริมาณสารสกัดมีอยู่ในไม้ประมาณ 5-20 % โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยสารอินทรีย์หลากหลายชนิดสารสกัดมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของไม้ เช่น สี กลิ่น ความต้านทานต่อการเน่าเปื่อย เป็นต้น ส่วนเถ้ามีอยู่ประมาณ 0.2-2 % โดยน้ำหนัก องค์ประกอบหลักของเถ้าในไม้ คือ แคลเซียม โพแทสเซียม และปริมาณเล็กน้อยของธาตุแมกนีเซียม โซเดียม แมงกานีส และเหล็ก

2.3 วัสดุผสม [20]

วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดจากของผสมที่ประกอบด้วยส่วนผสมหรือเฟสตั้งแต่ 2 เฟสหรือมากกว่านั้น มีลักษณะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้การพิจารณาว่าวัสดุเป็นวัสดุผสมหรือไม่สามารถพิจารณาได้จากหลัก 3 ประการ ดังนี้

- ส่วนผสมของทั้งคู่ต้องมีอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมและมีปริมาณมากกว่า 5 %
- ส่วนผสมต้องมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุผสมจึงมีสมบัติที่แตกต่างจากสมบัติของส่วนผสม เช่น ในกรณีของพลาสติก ถึงแม้ว่ามีการเติมสารเติมแต่งลงไปมากมายเพื่อช่วยในการขึ้นและเหตุผลในทางการค้า แต่พลาสติกดังกล่าวไม่ถูกเรียกว่าเป็นวัสดุผสม
- ส่วนผสมต้องไม่ผสมกลืนกันเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งแยกเฟสอย่างชัดเจน

องค์ประกอบของวัสดุผสม สามารถแบ่งแยกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. เมทริกซ์ (matrix) คือ ส่วนผสมที่โดยส่วนใหญ่แล้วมีสัดส่วนที่มาก และอยู่ในลักษณะต่อเนื่องโดยปกติแล้วสมบัติของเมทริกซ์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยส่วนผสมตัวอื่นที่นำ เข้ามาผสมรวมด้วย
2. สารเสริมแรง (reinforcement, reinforcing phase) คือ ส่วนผสมที่ทำหน้าที่ส่งเสริมสมบัติทางกลของเมทริกซ์ให้ดีขึ้น รูปร่างของสารเสริมแรงมีผลต่อประสิทธิภาพของสารเสริมแรง โดยปกติสารเสริมแรงมีรูปร่างที่มีลักษณะเป็นเส้นใย หรืออนุภาค

<u>ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม</u>

- สัดส่วนของส่วนผสม (volume fraction) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด กฎของการผสม เป็นดังแสดงในสมการที่ 1

$$\chi_c = \chi_m v_m + \chi_f v_f \quad (1)$$

โดยที่ χ_c คือ สมบัติของวัสดุผสมที่ต้องการทราบ

χ_m คือ สมบัติที่ต้องการทราบของเมทริกซ์

χ_f คือ สมบัติที่ต้องการทราบของสารเสริมแรง

v_m คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์

v_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารเสริมแรง

- ความแข็งแรงและพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส (interface) ของเมทริกซ์และสารเสริมแรงมีบทบาทที่มีความสำคัญ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การนำกฎการผสมมาใช้ได้อย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสด้วย
- รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง
- ขนาดของเกรนของเมทริกซ์
- สมบัติของส่วนผสมเอง

<u>ความแข็งแรงระหว่างเฟส</u>

ความแข็งแรงระหว่างเฟส มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุผสม เนื่องจากแรงกระทำระหว่างเฟสที่แข็งแรงสามารถทำ ให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ มีการส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปยังสารเสริมแรงได้โดยผ่านทางพื้นผิวระหว่างเฟส

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงระหว่างเฟส คือ

1. ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุผสมในสภาวะหนึ่งที่เมทริกซ์สามารถไหลได้ และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับของเหลว ความสามารถในการเปียก ณ ที่นี้อธิบายเกี่ยวกับความสามารถที่ของเหลว (เมทริกซ์) สามารถแพร่ขยายไปบนพื้นผิวของของแข็ง (สารเสริมแรง) ความสามารถในการเปียกที่ดี หมายความว่าของเหลว (เมทริกซ์) สามารถไหลไปบนพื้นผิวของสารเสริมแรงปกคลุมไปทั่วทุกตำแหน่งที่ไหลไปกระทบ ณ ตำ แหน่งพื้นผิวที่ไม่เรียบของสารเสริมแรง ของเหลวสามารถไหลเข้าไปแทนที่อากาศทั้งหมดได้ การเปียกเกิดขึ้นได้ถ้าความหนืดของเมทริกซ์ไม่สูงมากเกินไปและถ้าการเปียกนั้นส่งผลทำ ให้ค่าพลังงานอิสระ (free energy) ของระบบลดลง การกระจายตัวของของเหลวที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ต้องมีสมการเป็นดังแสดงในสมการที่ 2 และ3 ดังนี้

จาก $$\gamma_{SL}dA + \gamma_{LG}dA < \gamma_{SG}dA \quad (2)$$

หรือ $$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} < \gamma_{SG} \quad (3)$$

โดยที่ γ_{LG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวและก๊าซ

γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

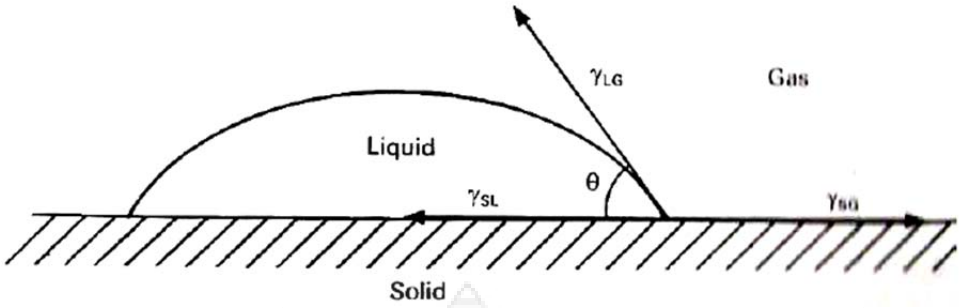
γ_{SG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและก๊าซ

dA คือ พื้นที่ผิวของของแข็งที่สัมผัสกับของเหลว

สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (spreading coefficient, SC) เป็นดังสมการที่ 4

$$SC = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{SG}) \quad (4)$$

เมทริกซ์สามารถเปียกสารเสริมแรงได้ เมื่อสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 7 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น [20]

จาก**รูปที่ 7** ค่ามุมสัมผัส (contact angle) มีค่าอยู่ในช่วง $0^\circ < \theta < 180^\circ$ และองศาของการเปียกมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อมุม θ ลดลง และถ้ามุม $\theta > 90^\circ$ มักถือว่าของเหลวไม่สามารถเปียกของแข็งได้

2. การยึดเกาะระหว่างเฟส (Interfacial bonding)

เมื่อเมทริกซ์สามารถสัมผัสกับสารเสริมแรงหรือเปียกสารเสริมแรงนั้นทำให้มีพันธะระหว่างเฟสเกิดขึ้น พันธะชนิดต่างๆ อาจถูกสร้างขึ้นในเวลาเดียวกัน เช่น พันธะทางเชิงกลและทางไฟฟ้า และกลไกของพันธะสามารถเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างขั้นตอนการผลิตที่หลากหลาย เช่น ในกรณีที่มีการนำสารคู่ควบ (coupling agent) มาใช้ในการปรับปรุงผิว

1. พันธะทางเชิงกล (mechanical bonding)

การเชื่อมต่อกันในทางเชิงกล (mechanical interlocking หรือ keying) ของสองพื้นผิว ดังแสดงใน**รูปที่ 8(a)** ลักษณะของพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสยิ่งมีความขรุขระมากขึ้น ยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยการหดตัวของเมทริกซ์บนสารเสริมแรงยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลเกิดได้ง่ายขึ้น พันธะทางเชิงกลจะมีประสิทธิภาพอย่างมาก เมื่อได้รับแรงกระทำในทิศทางที่ขนานกับรอยต่อระหว่างเฟส ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นความแข็งแรงของการได้รับแรงเฉือน แต่ถ้าได้รับแรงในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างเฟส หรือการที่รอยต่อได้รับแรงดึง ความแข็งแรงระหว่างเฟสมีค่าต่ำ เว้นเสียแต่ว่า ณ บริเวณรอยต่อนั้นมีลักษณะของพื้นผิวรอยต่อคล้ายกับบริเวณ A ใน**รูปที่ 8(a)** จำนวนมากๆ ซึ่งมีมุมแบบวกกลับเข้าไปข้างใน (re-entrant angle)

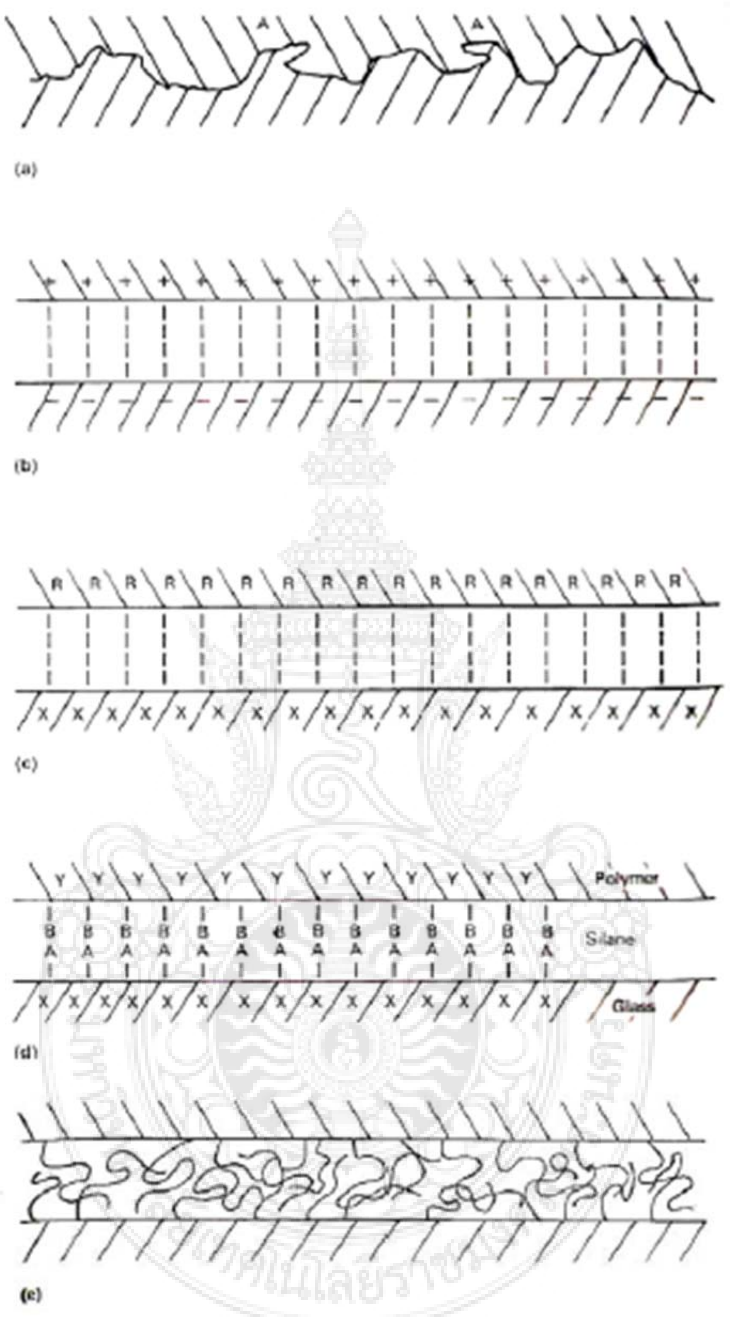
2. พันธะที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic bonding)

ไฟฟ้าสถิตย์เป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงที่มีพื้นผิวที่มีประจุแตกต่างกัน ดังแสดงใน**รูปที่ 8(b)** จึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าขึ้น แรงกระทำ ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในระยะทางการจัดเรียงของอะตอมในช่วงสั้นๆ เท่านั้น การปนเปื้อน ณ บริเวณผิวและการที่มีก๊าซถูกดักไว้ที่ผิวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกลไกดังกล่าวลดลง

3. พันธะทางเคมี (chemical bonding)

พันธะทางเคมีเกิดขึ้นจากหมู่ทางเคมีของเมทริกซ์และสารเสริมแรงสามารถเข้ากันได้ ดังแสดงใน**รูปที่ 8(c)** ความแข็งแรงของพันธะทางเคมี ขึ้นอยู่กับ ปริมาณหรือจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้นต่อหน่วยพื้นที่และชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เมทริกซ์และสารเสริมแรงไม่มีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์และสารคู่ควบ เช่น สารไซเลน (silane) ซึ่งมีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้าได้กับเมทริกซ์และสาร

เสริมแรงอยู่ภายในโครงสร้างโมเลกุล มันจึงทำ หน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงด้วยพันธะทางเคมี ดังแสดงใน**รูปที่ 8(d)**



รูปที่ 8 ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส [20]
(a) mechanical bonding
(b) electrostatic bonding
(c) chemical bonding
(d) chemical bonding as applied to a silane coupling agent
(e) interdiffusion bonding

4. พันธะที่เกิดจากการแพร่เข้าหากัน (interdiffusion bonding)

พันธะนี้เกิดขึ้นจากการที่สายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบทั้งสองชนิดสามารถแพร่เข้าหากันและทำให้เกิดการพันกันขึ้นระหว่างเฟส ดังแสดงใน**รูปที่ 8(e)** ความแข็งแรงของพันธะนี้ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของการพันกัน ชนิดและจำนวนของสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเกิดการพันได้

2.4 สารรมยา [21-22]

การรมยา (Fumigation) เป็นปฏิกิริยาของสารรมยา (Fumigant) ที่เข้าไปทำลายสิ่งมีชีวิตหรือแมลงขณะที่สารรมยาอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส ภายใต้สภาวะปิด เพื่อทำให้สารรมยาถูกกักเก็บในสถานะแก๊ส ณ บริเวณที่วางวัตถุดิบไม้ ข้าว หรือพืชที่ต้องการรมยา โดยไม่มีการรั่วซึมออกมาเพื่อวัตถุประสงค์ในการกำจัดสิ่งมีชีวิต

<u>สารรมยา</u> คือ สารเคมีซึ่งเมื่ออยู่ในอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมจะอยู่ในสถานะเป็นแก๊สและสามารถคงสภาพความเป็นแก๊สอยู่ได้ หากความเข้มข้นและเวลาเหมาะสมจะสามารถฆ่าสิ่งมีชีวิตได้

1. เมทธิลโบรไมด์ (Methyl bromide, CH_3Br) เป็นสารที่อยู่ในสถานะแก๊ส ณ อุณหภูมิห้อง เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่กลิ่น ไม่ติดไฟ สามารถละลายได้ดีในสารอินทรีย์ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะเกิดไฮโดรไลซ์ได้เมทธิลแอลกอฮอล์ และอนุมูลโบรไมด์ อาการที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับเมทธิลโบรไมด์เข้าสู่ร่างกาย กรณีการสูดดมหรือการซึมเข้าทางผิวหนังจะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ตาลาย หน้ามืด ทรงตัวลำบาก อ่อนเพลีย อัมพาต ปัสสาวะน้อยกว่าปกติ เนื่องจากไตบกพร่อง ความคิดสับสน ความดันต่ำ ชัก ปอดบวมน้ำ ตาย หากถูกผิวหนังจะระคายเคืองเป็นตุ่มพอง
2. ฟอสฟีน (Phosphine, H_3P) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายกระเทียม ได้มาจากอลูมินั่มฟอสไฟด์ (Aliminum phosphide) ซึ่งมีลักษณะเป็นสีเทาดำหรือเหลืองคล้ำ ทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศติดไฟได้ ละลายน้ำได้เล็กน้อย อาการที่เกิดขึ้นเมื่อกิน หรือสูดดมฟอสฟีน จะเกิดอาการปวดฟัน ขากรรไกรบวม มีการตายของเนื้อเยื่อบริเวณกระดูกขากรรไกรล่าง คลื่นไส้ อาเจียน ไอ อ่อนเพลีย น้ำหนักลด เม็ดเลือดแดงน้อยกว่าปกติ ตัวเหลือง ชากล้ามเนื้อ หายใจลำบาก ปอดบวมน้ำ หัวใจเต้นผิดปกติ ชักและอาจตายภายใน 4 วัน หรืออาจจะ 1-2 สัปดาห์
3. ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide, HCN) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ได้จากแคลเซียมไซยาไนด์ (Calcium cyanide) ซึ่งเป็นผลึกหรือเป็นผง สลายตัวด้วยความชื้นในอากาศ ลักษณะอาการที่เกิดขึ้นเมื่อกินหรือสูดดมอาจทำให้หมดสติ ชัก และตายภายใน 1-15 นาที หากได้รับในปริมาณที่ต่ำโดยการกิน สูดดม หรือเข้าทางผิวหนัง อาจทำให้เวียนศีรษะ หายใจเร็ว อาเจียน หน้าแดง ชีพจรเต้นเร็ว อาเจียนหน้าแดง หมดสติ ชัก และตายภายใน 4 ชั่วโมง
4. คาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide, CS_2) เป็นของเหลวติดไฟได้ดี หากกลั่นให้บริสุทธิ์ จะมีกลิ่นอ่อนๆ ถ้าไม่บริสุทธิ์จะมีกลิ่นเหม็น เผาไหม้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.5 คุณภาพของน้ำ

น้ำสามารถมีสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารต่างๆ ที่ละลายปะปนอยู่ในน้ำ คุณภาพน้ำหรือคุณลักษณะของน้ำโดยทั่วไปจึงสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพ (Physical Quality) คุณภาพน้ำทางด้านเคมี (Chemical Quality) และคุณภาพน้ำทางด้านชีวภาพ

(Biological Quality) แต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะคุณภาพน้ำทางกายภาพ และเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยเท่านั้น

<u>คุณภาพน้ำทางกายภาพ</u> [23]

คุณภาพน้ำทางกายภาพเป็นคุณลักษณะของน้ำโดยทั่วไปที่สามารถสัมผัสได้ด้วยประสาทสัมผัส เช่น ด้วยตา ด้วยการดมกลิ่น และด้วยการลิ้มรส เป็นต้น คุณภาพของน้ำทางกายภาพ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. *ความขุ่น (Turbidity)* เกิดจากสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือเป็นคอลลอยด์ (Colloid) เช่น พวกโคลน, ทรายแป้ง, แพลงค์ตอน เป็นต้น โดยสิ่งเหล่านี้จะบดบังหรือทำให้แสงหักเห เมื่อมีแสงส่องผ่านทำให้มองเห็นความขุ่นในน้ำขึ้น ค่าความขุ่นของน้ำเป็นดัชนีคุณภาพน้ำที่สังเกตเห็นได้ง่ายที่สุด
2. *สี (color)* สีของน้ำเกิดจากการสะท้อนแสงของสารแขวนลอยในน้ำ เช่น น้ำตามธรรมชาติจะมีสีเหลือง ซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ น้ำในแหล่งน้ำที่มีใบไม้ทับถมจะมีสีน้ำตาล หรือถ้ามีตะไคร่น้ำก็จะมีสีเขียว
3. *รสและกลิ่น (Taste and Odor)* เกิดจากสารอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่ และอาจเกิดจากสารอนินทรีย์วัตถุบางตัวได้ กลิ่นในน้ำอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ ดังนี้ เช่น เกิดจากสาหร่ายบางชนิดที่สามารถสร้างน้ำมันระเหย (Volatile Oil) ได้ เกิดจากการที่แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วเกิดก๊าซต่างๆ ซึ่งละลายในน้ำ เช่น ก๊าซไข่เน่า (H_2S) รวมทั้งอาจเกิดจากสารเคมีที่ใส่ลงไปฆ่าเชื้อโรคในระบบประปามากเกินไป เช่น กลิ่นของคลอรีนในน้ำ เป็นต้น สำหรับรสในน้ำมักเกิดจากสารอนินทรีย์ เช่น สารประกอบพวกด่างจะทำให้น้ำมีรสขม ในขณะที่เกลือของโลหะจะให้รสกร่อยหรือขม แล้วแต่ชนิดของโลหะกับเกลือ รสและกลิ่นในน้ำมักเป็นปัญหาโดยตรงต่อน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค ทำให้น้ำนั้นไม่สามารถนำมาดื่ม หรือใช้สอย
4. *อุณหภูมิ (temperature)* อุณหภูมิของน้ำมีผลในด้านการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อการลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ
5. *การนำไฟฟ้า (electrical conductivity)* บอกถึงความสามารถของน้ำที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอิออนโดยรวมในน้ำ และอุณหภูมิขณะทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า
6. *ของแข็งทั้งหมด (total solid: TS)* คือ ปริมาณของแข็งหรือสารทั้งหมดที่อยู่ในน้ำ ซึ่งคงเหลืออยู่ภายหลังจากผ่านการระเหยออกของน้ำจนหมดที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส
    - *ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids: TDS)*: ของแข็งที่ละลายน้ำได้ ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็ก ดังนั้นเมื่อนำน้ำตัวอย่างมากรอง ของแข็งที่ละลายน้ำจะลอดผ่านรูกระดาษกรองที่มีขนาด 1.2 ไมครอน ของแข็งละลายน้ำประกอบด้วยอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่ารูกระดาษกรอง และโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ
    - *ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids: SS):* ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แต่แขวนลอยในน้ำ และเมื่อกรองจะติดอยู่บนกระดาษกรองมาตรฐานหลังจากการกรอง แล้วนำกระดากรองที่มีของแข็งมาอบเพื่อระเหยน้ำออก ณ 103-105 องศาเซลเซียส
    - *ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids: VS):* ของแข็งที่ระเหยออกไปเมื่อนำน้ำตัวอย่างไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 ± 50 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ของแข็งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ระเหยออกไป และของแข็งส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ติดค้างอยู่ในรูปของขี้เถ้าที่เรียกว่า “ของแข็งคงตัว (FS)”

คุณภาพน้ำทางเคมี [23]

คุณภาพน้ำทางเคมีเกิดจากการละลายของสารประกอบต่างๆ ทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีมาก สารประกอบเหล่านี้สามารถทำให้คุณภาพของน้ำเปลี่ยนแปลงไปได้ อาจทำให้น้ำนั้นไม่ปลอดภัยที่จะใช้ดื่ม เพราะสารบางชนิดอาจเป็นพิษต่อมนุษย์ได้ ดัชนีหรือพารามิเตอร์ทางด้านเคมีมีจำนวนพารามิเตอร์อยู่มาก ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะที่มีความสำคัญ โดยเน้นที่เกี่ยวข้องกับ น้ำดื่มเป็นหลัก ดังต่อไปนี้

1. *pH* แสดงความเป็นกรดหรือเบสของน้ำ (น้ำดื่มควรมีค่า pH ระหว่าง 6.8-7.3) โดยทั่วไปน้ำที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า pH ที่ต่ำ (pH < 7) มีความเป็นกรดสูงมีฤทธิ์กัดกร่อน การวัดค่า pH ทำได้โดยการใช้กระดาษลิตมัสหรือใช้ pH meter
2. *ความกระด้าง (hardness)* มีผลให้น้ำไม่เกิดฟองกับสบู่ และเมื่อต้มน้ำกระด้างนี้จะเกิดตะกอนขึ้น น้ำกระด้างชั่วคราวเกิดจากสารไบคาร์บอเนต (HCO_3^{2-}) รวมตัวกับไอออนของโลหะเช่น Ca^{2+}, Mg^{2+} ซึ่งสามารถแก้ได้โดยการต้ม นอกจากนี้แล้วยังมีความกระด้างถาวรซึ่งเกิดจากอิออนของโลหะและสารที่ไม่ใช่พวกคาร์บอเนต เช่น SO_4^{2-} ,NO_3^- , Cl^- รวมตัวกับ Ca^+, Fe^{2+},Mg^{2+}เป็นต้น
3. *ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO)* แบคทีเรียที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) ในการย่อยสลายสารอนินทรีย์ ความต้องการออกซิเจนของ แบคทีเรียนี้จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ดังนั้นในน้ำที่สะอาดจะมีค่า DO สูง และน้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำ มาตรฐานของน้ำที่มีคุณภาพดีโดยทั่วไปจะมีค่า DO ประมาณ 5-8 ppm หรือ ปริมาณ O ละลายอยู่ปริมาณ 5-8 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ 5-8 ppm. น้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำกว่า 3 ppm. ค่า DO มีความสำคัญในการบ่งบอกว่าแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตหรือไม่
4. *บีโอดี (biological oxygen demand, BOD)* เป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ น้ำที่มีคุณภาพดี ควรมีค่าบีโอดี ไม่เกิน 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าค่าบีโอดีสูงมากแสดงว่าน้ำนั้นเน่ามาก แหล่งน้ำที่มีค่าบีโอดีสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจะจัดเป็นน้ำเน่าหรือน้ำเสีย พระราชบัญญัติน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดไว้ว่า น้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต้องมีค่าบีโอดีไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับในน้ำแหล่งใดที่มีสารประกอบอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน และไพรีดีน จุลินทรีย์ไม่สามารถใช้ O_2 ในการย่อยสลายสารเหล่านี้ได้
5. *ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)* ปริมาณ O_2 ที่สารเคมีใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายด้วยสารเคมีโดยการออกซิไดซ์ โดยใช้สารละลาย เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในปริมาณมากเกินพอในสารละลายกรดซัลฟิวริก สารอินทรีย์ในน้ำทั้งหมด (สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้) สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ภายใต้ภาวะที่เป็นกรดและการให้ความร้อน ดังนั้นค่า COD จะมีค่ามากกว่า BOD เสมอ ค่า COD จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่แสดงถึงความสกปรกของน้ำเสีย
6. *ทีโอซี (Total Organic Carbon: TOC)* ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำประกอบด้วย อนินทรีย์คาร์บอน (Inorganic Carbon) ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตในน้ำ และอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon)
7. *เหล็ก (Iron: Fe) และแมงกานีส (Manganese: Mn)* เป็นแร่ธาตุที่พบได้โดยทั่วไปในดินและหินในรูปสารไม่ละลาย (Insoluble Form) อย่างไรก็ตามในธรรมชาติ เหล็กและแมงกานีสสามารถเปลี่ยนเป็นรูปของสารละลายในน้ำ (Soluble Form) ได้ หากน้ำนั้นมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือมีสภาพเป็น

กรด เหล็ก เฟอร์ริก (Ferric; Fe^{3+} ซึ่งเป็น Insoluble Form) จะถูกรีดิวส์เป็นเฟอรัส (Perrous; Fe^{2+} ซึ่งเป็น Soluble Form) ภายใต้สภาพที่ไร้อากาศ ทำนองเดียวกัน แมงกานีสจะถูกรีดิวส์จากประจุ +4 ซึ่งไม่ละลายน้ำเป็นประจุ +2 ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายในน้ำได้เช่นเดียวกัน รูปแบบของสารละลายเหล็กและแมงกานีสจะพบได้บ่อยในน้ำบาดาลและในน้ำชั้นล่างส่วนลึกของทะเลสาบหรืออ่างเก็บน้ำ น้ำซึ่งมีเหล็กและแมงกานีสอยู่จะไม่มีผลเป็นอันตรายต่อสุขภาพมากนัก แต่จะเป็นสาเหตุของความน่ารังเกียจที่จะดื่มน้ำนั้น เช่น ทำให้น้ำมีรสขม ทำให้น้ำมีสีแดง เป็นต้น

8. *คลอไรด์ (Chloride: Cl^-)* ปริมาณของคลอไรด์ในน้ำธรรมชาติมาจากหลายแหล่ง ได้แก่ คลอไรด์จากผิวดิน น้ำเสียของอาคารบ้านเรือน น้ำทะเล น้ำใต้ดินบริเวณที่มีเกลือสินเธาว์ และน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีคลอไรด์ น้ำที่มีคลอไรด์ประมาณ 250 มก./ลิตร จะมีรสกร่อยค่อนข้างเค็ม
9. *ไนไตรท์ (Nitrite: NO_2^-) และไนเตรท (Nitrate: NO_3^-)* ไนไตรท์และไนเตรทที่พบในน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์วัตถุต่างๆ โดยไนไตรท์เกิดจากปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ในการออกซิเดชันแอมโมเนีย ได้ไนไตรท์เป็นอันดับแรกก่อนที่จะกลายเป็นไนเตรท ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม
10. *โลหะหนัก (Toxic Heavy Metal)* โลหะหนักบางชนิดเป็นพิษต่อมนุษย์ ที่สำคัญ คือ ปรอท, ตะกั่ว, สารหนู, แคดเมียม, โครเมียม, ซิลิเนียม, ไซยาไนด์ โลหะหนักเหล่านี้บางตัวอาจมีอยู่ได้ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ หรืออาจเกิดการปนเปื้อนจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ และจากอุตสาหกรรม โลหะหนักที่เป็นพิษเหล่านี้จะส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ในการจัดการหรือจัดหาน้ำดื่มจึงต้องคำนึงถึง

2.6 ประเภทของน้ำเสีย

ประเภทของน้ำเสีย โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เช่นเดียวกับคุณภาพของน้ำ คือ ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ ลักษณะน้ำเสียทางเคมี และลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา แต่ ณ ที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ และลักษณะน้ำเสียทางเคมีเท่านั้น

<u>ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ</u> [24-25]

ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ คือ เกิดมาจากสสารที่อยู่ในน้ำเสียซึ่งมีผลต่อความขุ่น สี กลิ่น อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ รวมถึงปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในน้ำ

1. *ความขุ่น* มักเกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่ปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทกลุ่มสิ่งทอ กระดาษ โรงงานฟอกหนัง และโรงฆ่าสัตว์ โดยปัญหาของน้ำที่ขุ่นมากเกินไปส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ
2. *สีของน้ำ* มักถูกนำมาใช้ในการบอกสภาวะของน้ำเสีย เช่น น้ำเสียจากแหล่งชุมชนเริ่มต้นมักมีสีเทาปนน้ำตาลอ่อนๆ (Light Brownish-Gray Color) และเมื่อทิ้งไว้ระยะเวลานานขึ้นโดยไม่ได้ทำการบำบัดจะมีผลทำให้น้ำกลายเป็นสีเทาหรือเทาเข้ม (Gray หรือ Dark Gray) และในที่สุดจะกลาย เป็นสีดำและเมื่อน้ำเสียกลายเป็นสีดำมักกล่าวว่าน้ำนั้นเกิดการเน่า (Septic) ส่วนกรณีน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดอาจมีสีได้ต่างๆ กันไป แต่ส่วนใหญ่จะมีสีเป็นมีเทา สีเทาเข้มหรือสีดำอันเนื่องมาจากการเกิดพวกซัลไฟด์ของโลหะ (Metallic Sulfides) ขึ้นภายใต้สภาวะขาดออกซิเจน (Anaerobic Conditions) ได้ทำปฏิกิริยากับพวกโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย

3. *กลิ่นของน้ำ* เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ โดยกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียชนิดใช้ออกซิเจน หรือกลิ่นอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น เหล่านี้อาจทำให้ในน้ำเสียมีกลิ่น เช่น ฟีนอล แอมโมเนีย ซัลไฟด์ ไซยาไนด์ ฯลฯ
4. *อุณหภูมิ* โดยทั่วไปอุณหภูมิของน้ำเสียจะสูงกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศ ยกเว้นในฤดูร้อนอุณหภูมิของน้ำเสียอาจจะต่ำกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศ อุณหภูมิของน้ำเสียมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำ ดังนี้
   - ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ อุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์และพืชน้ำ สัตว์และพืชน้ำแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน และถ้าอุณหภูมิของน้ำในแหล่งน้ำสูงเกินไปก็อาจทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายได้ในทันที
   - ผลกระทบต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆ การจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดีมักเกิดที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ในน้ำจะเกิดได้อย่างรวดเร็ว มีผลทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำเพิ่มจำนวนมากขึ้นเป็นผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว อาจทำให้แหล่งน้ำมีออกซิเจนละลายอยู่ในปริมาณที่ไม่พอเพียงต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตในน้ำ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาเคมีของแบคทีเรีย อยู่ที่อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส และมักจะหยุดชะงักที่อุณหภูมิถึง 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะพวกที่ย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาวะที่ออกซิเจนและพวกแบคทีเรียที่ทำให้เกิดไนตริฟิเคชั่น (Nitrification) และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methane-Producing Bacteria) ไม่เจริญเติบโต
   - ผลต่อการละลายของก๊าซออกซิเจนในน้ำ การละลายของก๊าซออกซิเจนในน้ำขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณสารที่ละลายอยู่ในน้ำ ถ้าหากน้ำมีอุณหภูมิสูง การละลายของก๊าซในน้ำก็น้อยทำให้มีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยเฉพาะปลาซึ่งโดยทั่วๆ ไปต้องให้มีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำมากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส และไม่มีสิ่งสกปรกใดๆ ละลายอยู่ในน้ำเลย ก๊าซออกซิเจนละลายน้ำได้ตั้งแต่ 7.54-9.08 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความดันบรรยากาศปรกติ
5. *ของแข็งในน้ำ* มาจากสารแขวนลอยม ตะกอนหนัก และของแข็งที่ละลายน้ำ ซึ่งเมื่อจมตัวสู่ก้นลำน้ำมีผลทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำเกิดความตื้นเขิน มีความขุ่นสูง มีผลกระทบต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ และการนำน้ำมาใช้ประโยชน์

<u>ลักษณะน้ำเสียทางเคมี</u> [24-25]

ลักษณะน้ำเสียทางเคมี เกี่ยวข้องกับค่า pH, ค่าความกระด้าง, ปริมาณออกซิเจน, ค่าบีโอดี, ค่าซีโอดี, ค่าทีโอซี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และปริมาณของโลหะหนัก เป็นต้น

1. *ค่า pH* เป็นค่าที่มีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ ค่า pH ของน้ำทิ้งที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5-9
2. *ค่าความกระด้าง* เป็นผลมาจากเป็นผลมาจาก OH^-, CO_3^{2-} และ HCO^{3-} ของธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โปรตัสเซียม หรือของแอมโมเนีย แต่ $Ca(HCO_3)^2$ และ $Mg(HCO_3)^2$ จะมีอยู่ในน้ำเสียมากกว่าสารอื่น ๆ ซึ่งทำให้มีค่าความเป็นด่างในน้ำเสีย ค่าของความเป็นด่างจะมีความสัมพันธ์กันกับค่าของ pH คือ ถ้า pH มีค่าต่ำที่น้อยกว่า 4.5 ค่าความเป็นด่างของน้ำเสียนี้จะมี

เท่ากับ 0 โดยจะมีค่าความเป็นกรดเท่านั้น หรือถ้า pH มีค่าสูงมากๆ คือ มากกว่า 8.3 ค่าความเป็นกรดของน้ำเสียนี้จะมีเท่ากับ 0 โดยจะมีแต่ค่าความเป็นด่าง เท่านั้น

3. *ค่าบีโอดี* นิยมใช้บ่งบอกปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ ถ้าค่าบีโอดีมีค่าสูง แสดงว่าสารอินทรีย์ที่ปะปนในน้ำมีปริมาณมาก และนั่นจะทำให้สภาพเน่าเหม็นของน้ำเกิดขึ้นได้ง่าย
4. *ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ* เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำมีปริมาณมากขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจนมีปริมาณมากขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ หรือค่าดีโอมีค่าต่ำหรือมีค่าลดลงในระยะเวลาอันสั้นได้ ทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็นของน้ำ
5. *ธาตุไนโตรเจน* เป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์ ดังนั้นในกระบวน การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีววิทยาจำเป็นต้องมีสารไนโตรเจนพอเพียงในน้ำเสียถ้ามีไม่พอจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเติมสารไนโตรเจนผสมลงไปในน้ำเสีย แต่ถ้ามีมากเกินไปในแม่น้ำลำคลองหรือบ่อน้ำทั่วๆ ไป ก็จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นคือจะมีการเจริญเติบโตของสาหร่ายมากในน้ำลำคลองนั้นๆ ได้
6. *ฟอสฟอรัส* เป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์ต่างๆ เช่นเดียวกันกับไนโตรเจน และก็เช่นเดียวกันถ้ามีฟอสฟอรัสมากเกินไปในแม่น้ำลำคลอง หรือบ่อน้ำทั่วๆ ไป จะเป็นผลให้มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายมาก ซึ่งจะทำให้ระบบสิ่งแวดล้อมในแม่น้ำลำคลองนั้นๆ เสียไปได้
7. *โลหะหนัก* อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหาร เกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท โครเมียม ทองแดง ปกติโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมาจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารพิษนี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านซุบโลหะ อู่ซ่อมรถ ฯลฯ ถ้ามีธาตุเหล่านี้มากเกินไปในน้ำก็จะเป็นพิษร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลายได้

2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Haloui, A. และ Vergnaud, J.M. (1997) [26] ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยสารเคมีที่ถูกใช้ในการป้องกันไม้จากการเสื่อมสภาพจากเชื้อราซึ่งสารเคมีที่หลากหลายเหล่านี้สามารถถูกปลดปล่อยออกมาในน้ำนำไปสู่การเกิดมลภาวะทางน้ำ โดยในงานวิจัยได้ทำการศึกษากลไกการปลดปล่อยสารเพนตะคลอโรฟีนอล (pentachlorophenol) โดยพิจารณาจากการแพร่ของสารเพนตะคลอโรฟีนอลผ่านไปตามรูปร่างของไม้ในสามแนวแกน พบว่า การแพร่ของสารเพนตะคลอโรฟีนอลในแนวแกนตามยาวมีมากกว่าอีก 2 แนวแกน ขนาดรูปร่างของชิ้นงานไม้มีผลอย่างมากต่อเวลาที่สารเพนตะคลอโรฟีนอลเกิดการปลดปล่อย

Schäfer, M. และ Riffael, E. (2000) [27] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาบทบาทของสารที่เป็นองค์ประกอบหลักในไม้ที่มีต่อการปลดปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์ จากการศึกษา พบว่า ลิกนินเป็นองค์ประกอบในไม้ที่มีการปลดปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์มากกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และกระบวนการสกัดเยื่อกระดาษ (pulping) ด้วยกระบวนการทางความร้อนและเชิงกล (Thermo-mechanical pulping) ซึ่งมีการใช้ไอน้ำและความร้อน (thermal hydrolytic treatment) มีผลอย่างมากในการเพิ่มปริมาณการปลดปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มอุณหภูมิ

Fabbricino, M. และคณะ (2005) [28] ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยทองแดงในน้ำดื่มที่มีผลมาจากการกัดกร่อนภายในท่อจ่ายน้ำ โดยได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาที่น้ำอยู่นิ่งที่มีผลต่อปริมาณโลหะที่ปลดปล่อยในน้ำดื่ม โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่น้ำอยู่นิ่งให้อยู่ในช่วง 15 ถึง 90 นาที จากการศึกษา

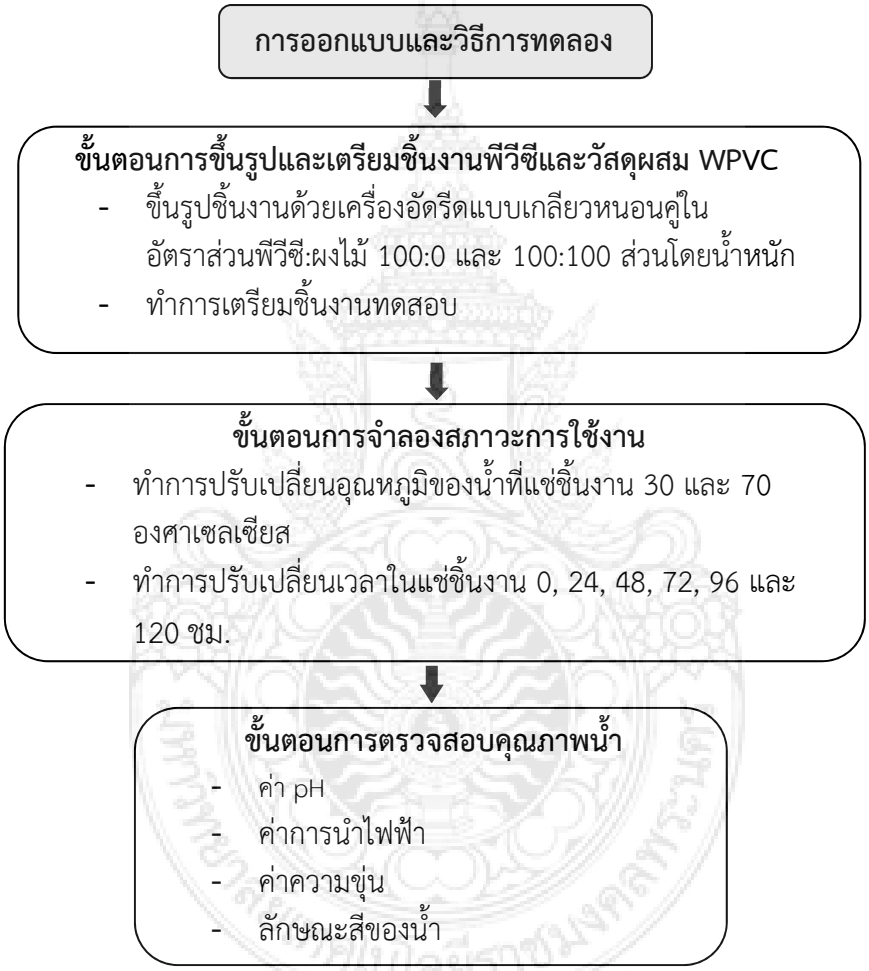
พบว่า ปริมาณการกัดกร่อนของโลหะที่ผิวท่อมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะเวลาที่น้ำอยู่นิ่ง รวมถึงปริมาณของทองแดงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากท่อน้ำด้วย

Chinhanga, J.R. (2010) [29] ได้ตรวจสอบปริมาณของโลหะหนักในแม่น้ำเควกควี (Kwekwe) ณ บริเวณต้นน้ำ และปลายน้ำของจุดที่มีการปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาในช่วงเดือนเมษายนและมิถุนายน คศ. 2005 จากการศึกษาพบว่า ปริมาณของโลหะหนักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ณ บริเวณปลายน้ำ และโลหะที่พบมากที่สุดซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณภาพน้ำ คือ แคลเซียมและเหล็ก

Ijeoma, K. และ Achi, O.K. (2011) [30] ได้ทำการศึกษาผลของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกปล่อยลงแม่น้ำไนจีเรียนที่มีต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำ จากการศึกษาพบว่า น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีปริมาณของสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในปริมาณที่สูงส่งผลทำให้แบคทีเรียชนิดโคลิฟอร์ม (Coliform) และแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มลภาวะที่เลวร้ายถูกพบมากบริเวณที่มีการปล่อยน้ำทิ้งจากโรงกลั่น และโรงงานปิโตรเคมี

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เริ่มต้นจากการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและขี้เลื่อยไม้ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยทำการขึ้นในอัตราส่วนพีวีซี:ผงไม้ 100:0 และ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมาทำการเตรียมชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาจำลองสภาวะการใช้งาน โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และเวลาในการแช่ชิ้นงานทดสอบ และทำการตรวจสอบคุณภาพของน้ำ โดยมีรายละเอียดของแผนการดำเนินงาน ดัง**รูปที่ 9**



รูปที่ 9 แผนการดำเนินงานวิจัยการศึกษาการปลดปล่อยสารเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำทางกายภาพและทางเคมี

วิธีการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปและเตรียมชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC

3.1.1 ขั้นตอนการการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

เริ่มต้นจากการนำพีวีซี สารเคมี ดัง**ตารางที่ 2** และผงไม้ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่มาปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง ดังแสดงใน**รูปที่ 10** เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำของผสมมาผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากบริษัท Enmach จำกัด ดัง**รูปที่ 11** เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ดังแสดงใน**รูปที่ 12** และใช้ความเร็วรอบสกรู 40 รอบ/นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจากตำแหน่งป้อนเม็ดถึงหัวขึ้นรูป คือ 170, 160, 150, 140, 135 และ 175 องศาเซลเซียส ภายหลังที่ชิ้นงานออกจากหัวขึ้นรูปถูกทำให้เย็นตัวด้วยน้ำหล่อเย็น

ตารางที่ 2 รายละเอียดของพีวีซีและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานพีวีซีและWPVC

รายละเอียดของสาร	ปริมาณ (phr)
พีวีซี เกรดอัดรีด (SIAMVIC® 258RB)	100.0
สารหล่อลื่นภายนอก	0.6
สารหล่อลื่นภายใน (Ca-St)	0.6
สารช่วยขึ้นรูป (PA-20)	6.0
สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (PF608)	3.6
สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสง (Tinuvin P)	2.0
ผงไม้	0.0 และ 100.0

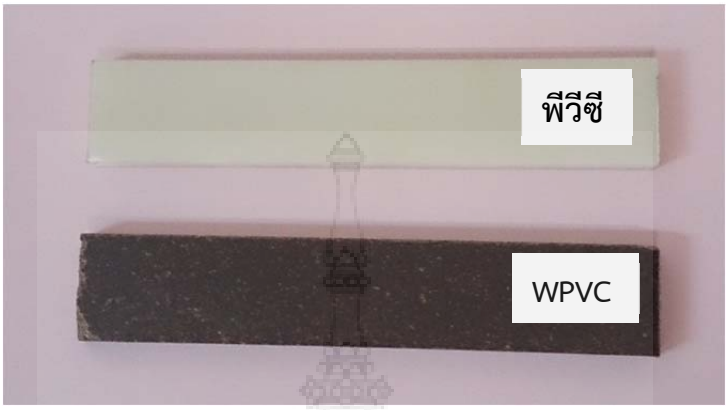
รูปที่ 10 เครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง

รูปที่ 11 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

รูปที่ 12 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีด

3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มาทำการตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน และขัดด้วยกระดาษทราย โดยทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบให้มีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 15 x 80 x 4 มิลลิเมตร ดังแสดงใน**รูปที่ 13**



รูปที่ 13 ชิ้นงานทดสอบ

3.2 ขั้นตอนการจำลองสภาวะการใช้งาน

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการจำลองสภาวะการใช้งานของชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ที่ต้องใช้งานการแจ้งและต้องเผชิญกับสภาวะที่มีความชื้น ทำการจำลองสภาวะโดยการนำชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ไปแช่ในน้ำกลั่นที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำที่แช่ชิ้นงานที่ 30 และ 70 องศาเซลเซียส และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในแช่ชิ้นงาน ตั้งแต่ 0, 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง โดยทุกๆ สภาวะการทดสอบได้ทำการทดลองจำนวน 3 ชุดตัวอย่าง การควบคุมอุณหภูมิของน้ำทำโดยการทดลองจำลองสภาวะโดยการใช้ตู้อบ ดังแสดงใน**รูปที่ 14**

รูปที่ 14 การจำลองสภาวะการใช้งานโดยการใช้ตู้อบ

3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพน้ำ

3.3.1 การวัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า

การวัดค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานสามารถดำเนินการวัดได้ในเวลาเดียวกันด้วยเครื่อง pH meter รุ่น HACH HQ40d ของบริษัท HACH Company World ประเทศแคนาดา ดังแสดงใน**รูปที่ 15** โดยก่อนเริ่มวัดค่า pH ต้องทำการปรับเทียบเครื่อง (calibration) กับสารละลายมาตรฐานก่อนทำการทดสอบ และในการทดสอบน้ำตัวอย่างแต่ละสภาวะการทดสอบดำเนินการวัดทั้งหมด 3 ชุดตัวอย่าง และทำการวัดแต่ละชุดตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง

รูปที่ 15 การวัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำด้วยเครื่อง pH meter รุ่น HACH HQ40d

3.3.2 การวัดค่าความขุ่นของน้ำ

การวัดค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานทดสอบดำเนินการโดยการวัดน้ำตัวอย่างด้วยเครื่อง turbidimeter รุ่น HACH 2100Q ของบริษัท HACH Company World ประเทศแคนาดา ดังแสดงใน**รูปที่ 16** ซึ่งในการวัดต้องมีการปรับเทียบค่าความขุ่นมาตรฐานก่อนทุกครั้ง โดยใช้ขวดที่บรรจุค่าความขุ่นมาตรฐานมาทำการปรับเทียบ และในการทดสอบน้ำตัวอย่างแต่ละสภาวะการทดสอบดำเนินการวัดทั้งหมด 3 ชุดตัวอย่าง และทำการวัดแต่ละชุดตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง

รูปที่ 16 การวัดค่าความขุ่นของน้ำด้วยเครื่อง turbidimeter รุ่น HACH 2100Q

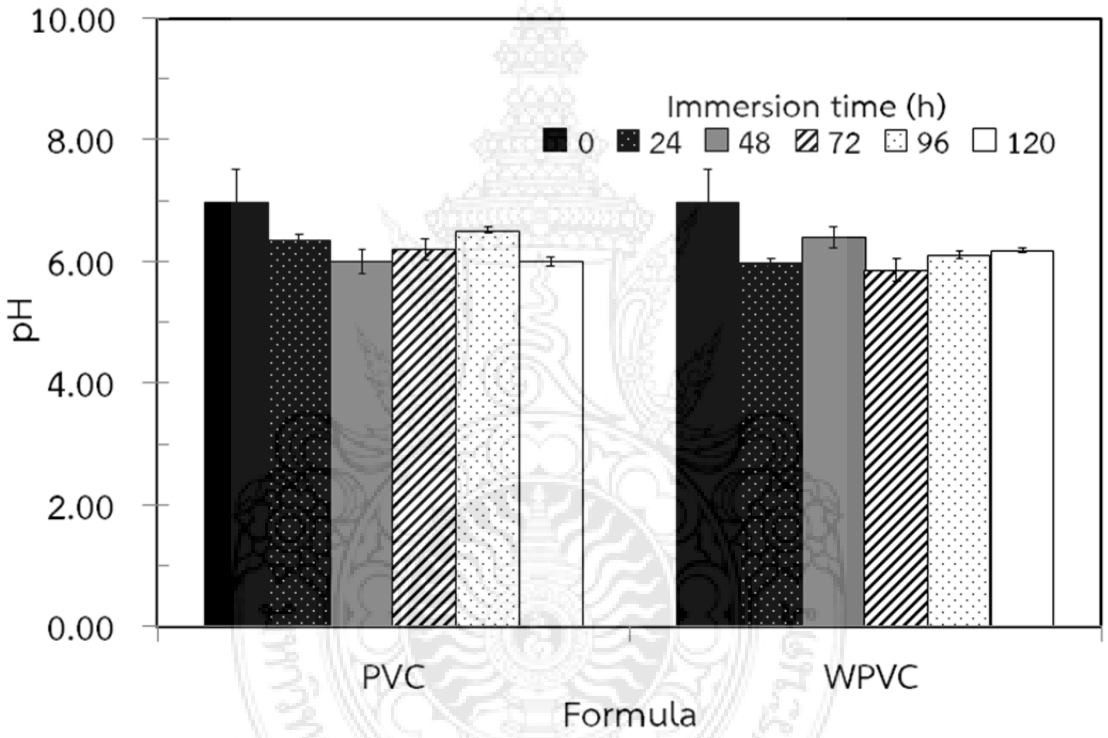
3.3.3 ลักษณะสีของน้ำ

ทำการเปรียบเทียบสีของน้ำในการจำลองสภาวะการใช้งาน ณ อุณหภูมิ และเวลาในการแช่ชิ้นงานทดสอบต่างๆ กัน โดยทำการเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

คุณภาพของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ในอัตราส่วนพีวีซี:ผงไม้ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการแช่ชิ้นงาน ตั้งแต่ 0, 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ถูกนำมาประเมินคุณภาพของน้ำทั้งทางกายภาพและเคมี โดยมีรายละเอียดของผลการทดสอบดังต่อไปนี้

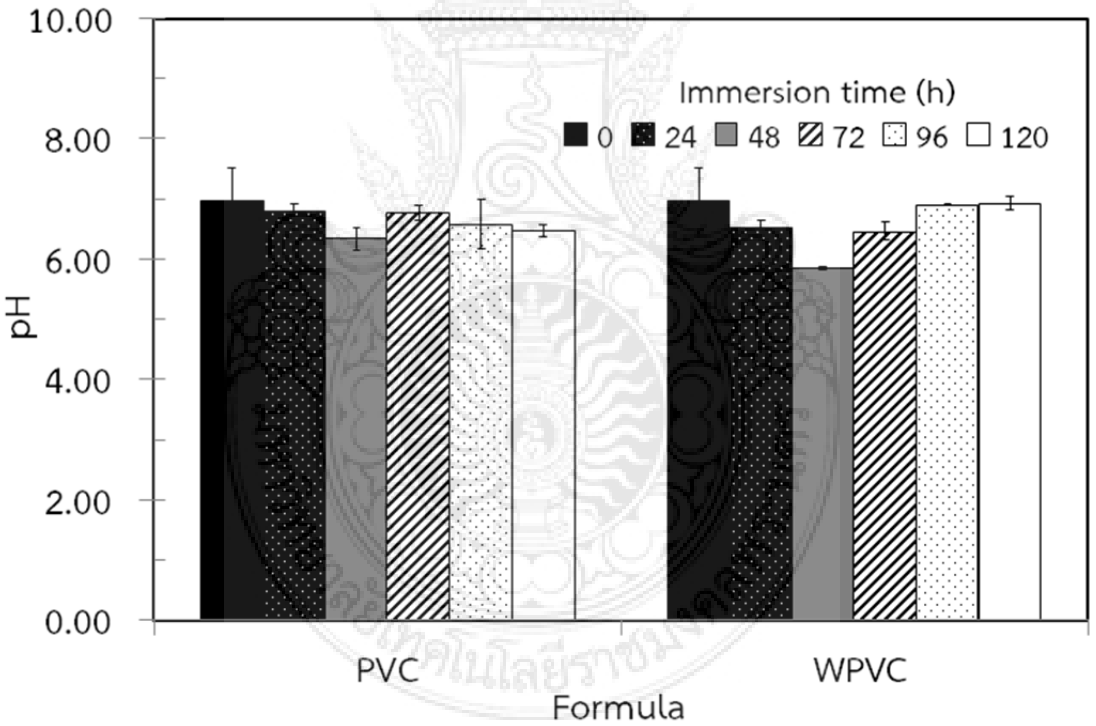
4.1 ค่า pH



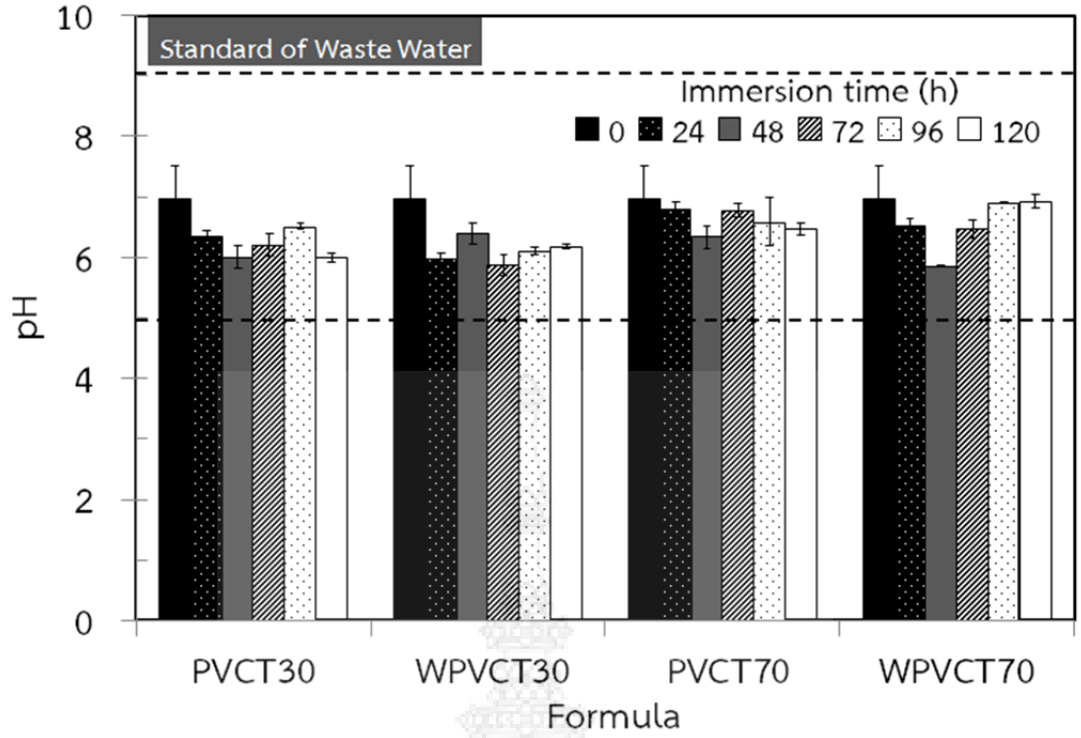
รูปที่ 17 ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ที่มีต่อค่า pH ของน้ำ ณ อุณหภูมิของน้ำ 30 องศาเซลเซียส

รูปที่ 17 แสดงค่า pH ของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน โดยที่ PVCT30 และ WPVCT30 คือ น้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากกราฟพบว่า ค่า pH ของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ณ อุณหภูมิของน้ำ 30 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยภายหลังจากการแช่ชิ้นงาน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปลดปล่อยของสารเคมีที่มีอยู่ในสูตรพีวีซี และสารรมยาที่มีอยู่ในผงไม้ลงในน้ำที่แช่ชิ้นงานมีผลทำให้น้ำมีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งอาจถูกนำมาใช้เป็นสารรมยาให้กับไม้ และมีฤทธิ์เป็นกรด ส่วน

ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงาน พบว่า เวลาที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ขณะที่ **รูปที่ 18** แสดงค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ณ อุณหภูมิของน้ำ 70 องศาเซลเซียส โดยที่ PVCT70 และ WPVCT70 คือ น้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ค่า pH ของน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อน้ำผ่านการแช่ชิ้นงาน และไม่สามารถสังเกตพบผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานที่มีต่อค่า pH เช่นเดียวกับกรณีอุณหภูมิของน้ำที่ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นได้นำผลการทดสอบค่า pH ของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิของน้ำ 30 และ 70 องศาเซลเซียส มาทำการเปรียบเทียบผลกัน และทำการเปรียบเทียบผลกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมควบคุมมลพิษ ดังแสดงใน**รูปที่ 19** ซึ่งพบว่า ผลของอุณหภูมิในการแช่ชิ้นงานส่งผลต่อค่า pH ของน้ำได้อย่างไม่ชัดเจนมากนัก และเมื่อพิจารณาเกณฑ์ค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากอาคารจากกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วง 5.0-9.0 [30] พบว่า ค่า pH ของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ยังคงอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว

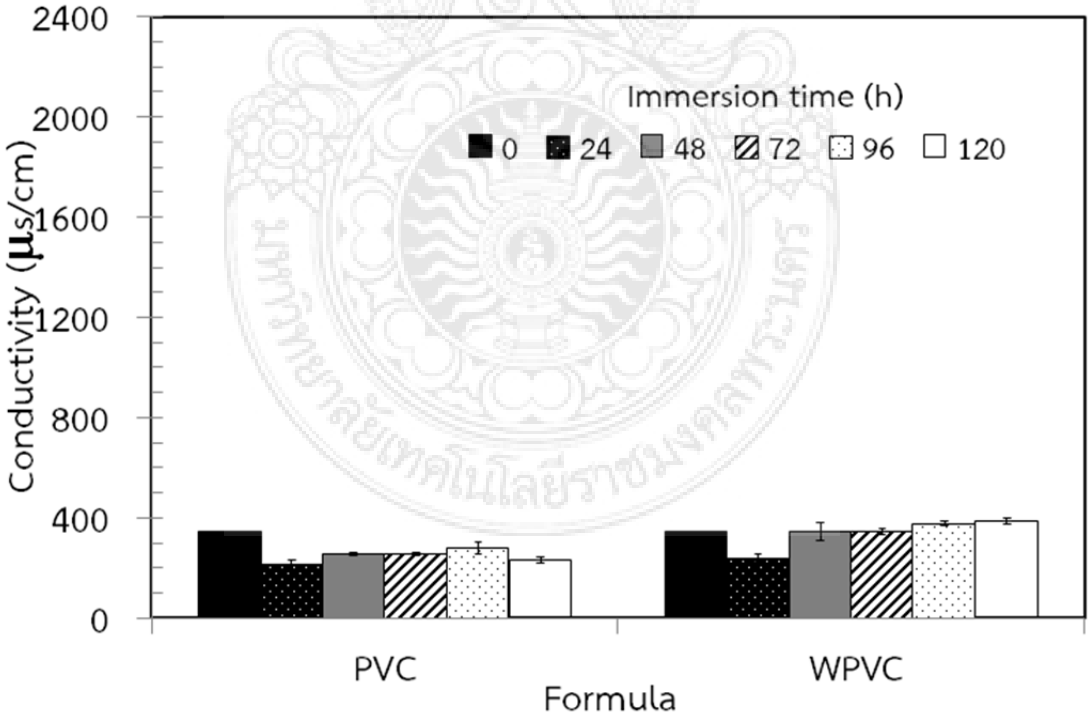


รูปที่ 18 ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ที่มีต่อค่า pH ของน้ำ ณ อุณหภูมิของน้ำ 70 องศาเซลเซียส

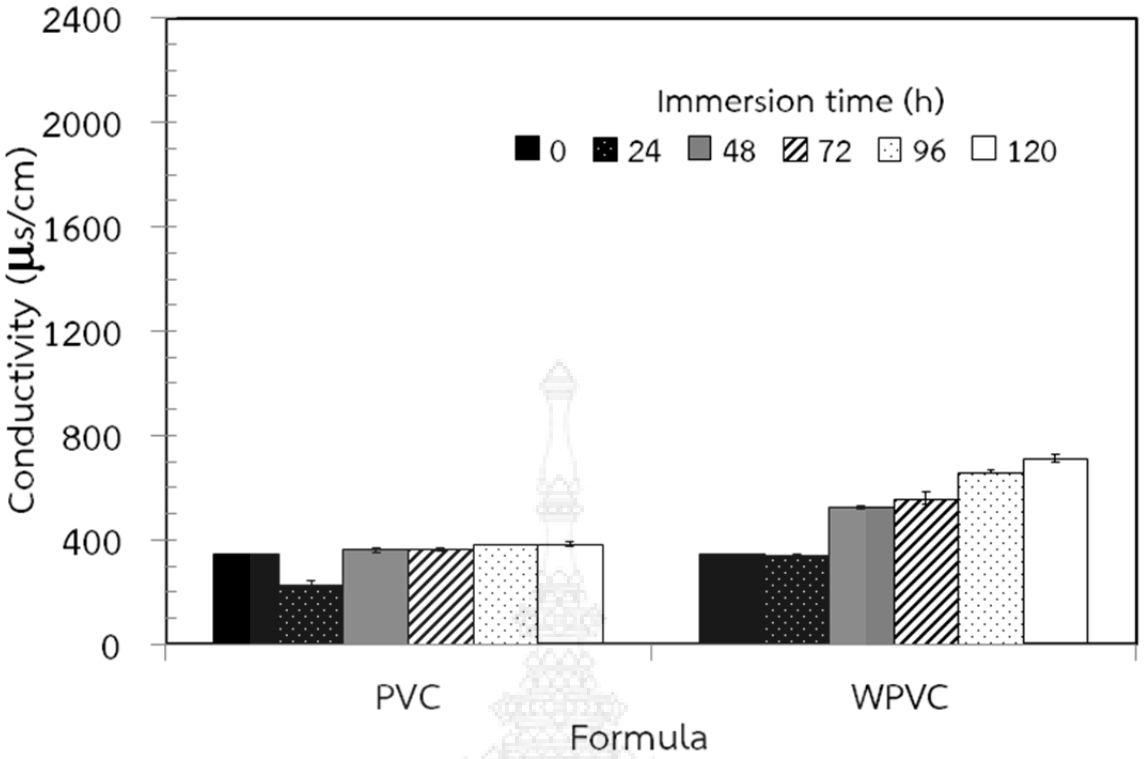


รูปที่ 19 ผลของเวลาและอุณหภูมิในแช่ชิ้นงานพีวีซี และ WPVC ที่มีต่อค่า pH ของน้ำ

4.2 ค่าการนำไฟฟ้า

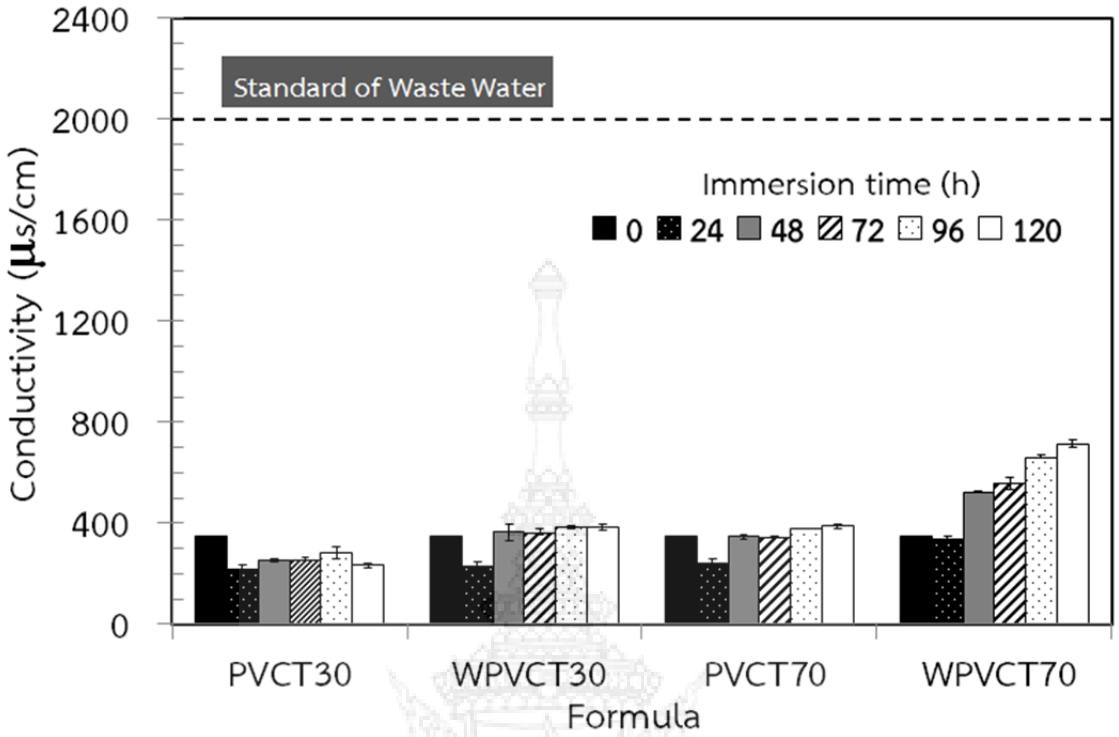


รูปที่ 20 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน



รูปที่ 21 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน

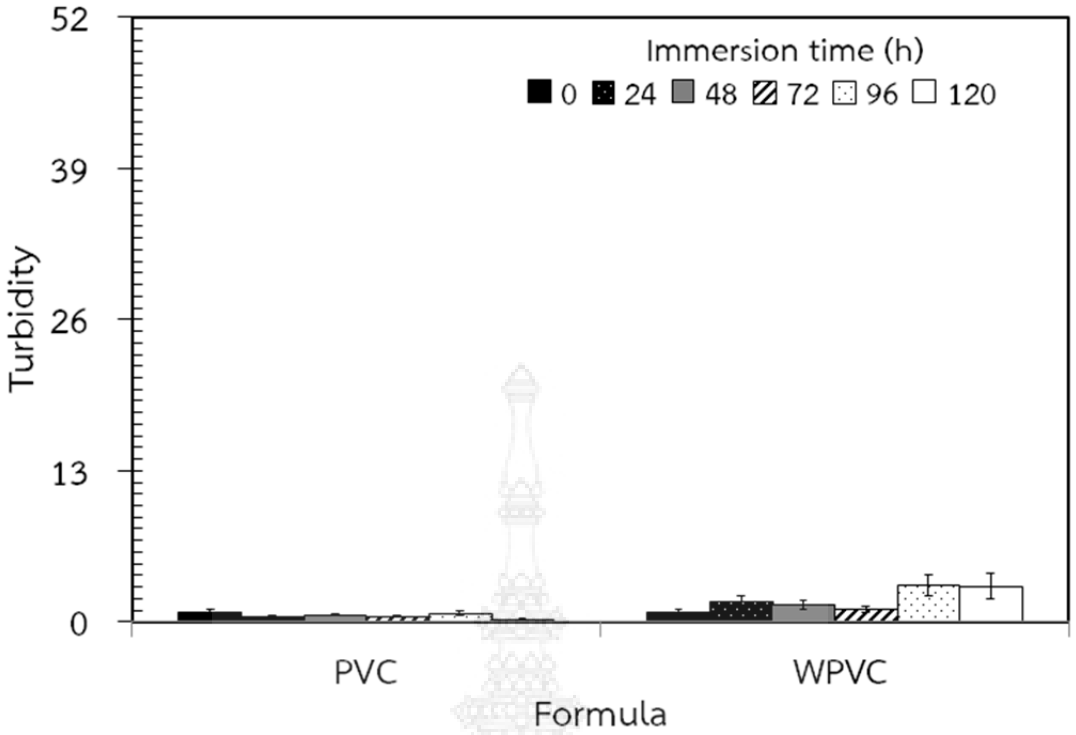
รูปที่ 20 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกรณีการแช่ชิ้นงานพีวีซีมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ในขณะที่กรณีการแช่ชิ้นงาน WPVC มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น **รูปที่ 21** แสดงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง แต่กรณีของการแช่ชิ้นงาน WPVC พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสของพีวีซีและไม้ลดลงส่งผลทำให้ไอออนของโลหะซึ่งมาจากสารเติมแต่งที่มีอยู่ในพีวีซีหลุดออกจากชิ้นงานจึงส่งผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าถูกแสดงดังใน**รูปที่ 22** จากผลการทดลอง พบว่า กรณีของการแช่ชิ้นงานพีวีซีไม่สามารถสังเกตเห็นผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำได้อย่างชัดเจนมากนัก ในขณะที่กรณีการแช่ชิ้นงาน WPVC สามารถสังเกตพบว่า อุณหภูมิของน้ำมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีสาเหตุเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ใน**รูปที่ 21** และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของชิ้นงานที่มีต่อคุณภาพน้ำ พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานตามเกณฑ์มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทานจากกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 2000 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (µs/cm) [30



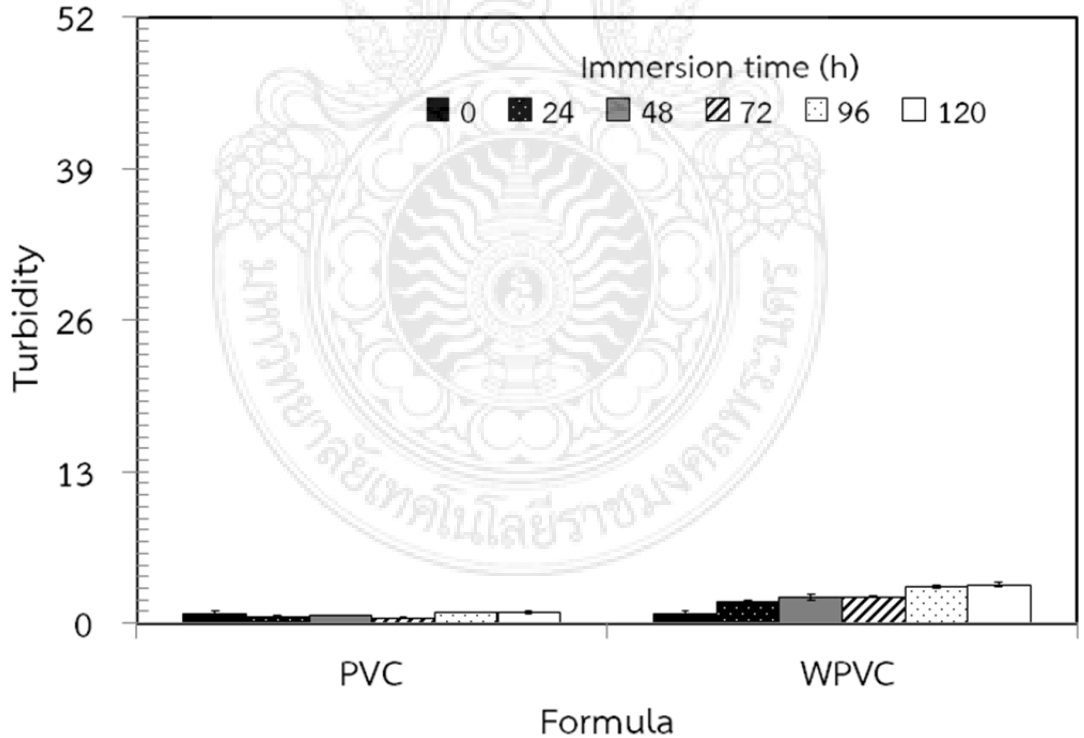
รูปที่ 22 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน

4.3 ค่าความขุ่นของน้ำ

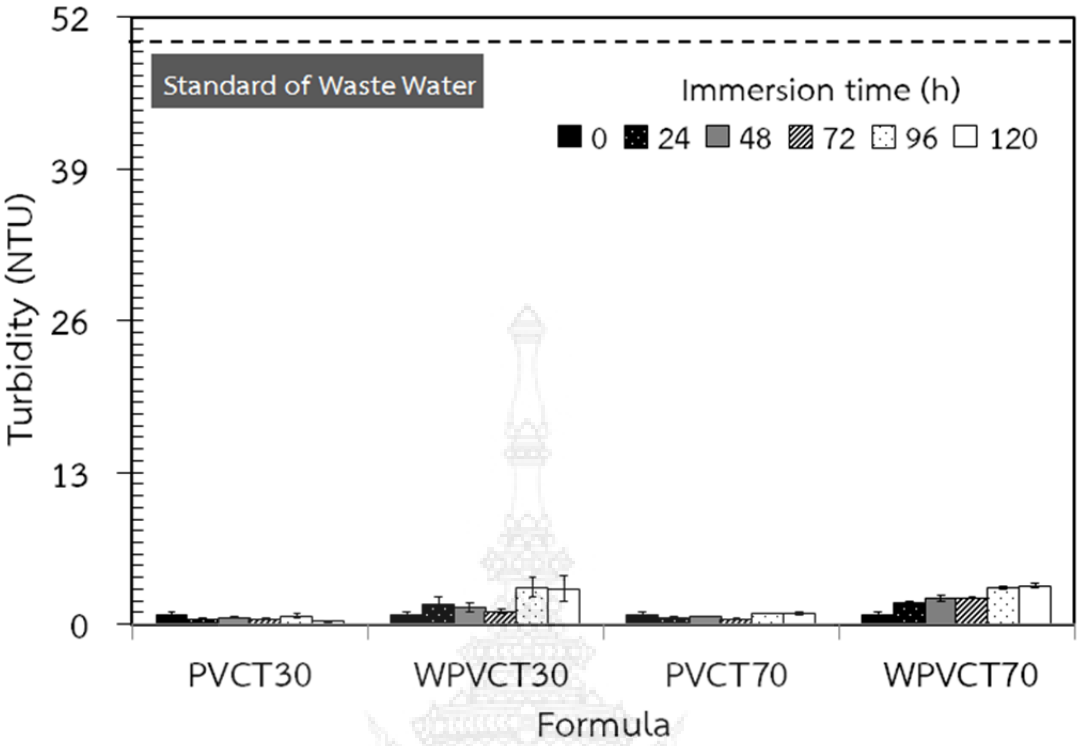
รูปที่ 23 และ**รูปที่ 24** แสดงค่าความขุ่นของน้ำที่ที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และWPVC ที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า กรณีการแช่ชิ้นงานพีวีซี ค่าความขุ่นของน้ำไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเวลาการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทั้งกรณีอุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ส่วนกรณี WPVC พบว่า ความขุ่นของน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานนานขึ้น ทั้งกรณีอุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส **รูปที่ 25** แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความขุ่นของน้ำ ซึ่งพบว่า ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความขุ่นของน้ำสามารถสังเกตพบเฉพาะกรณีของการแช่ชิ้นงาน WPVC เท่านั้น โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการแช่ชิ้นงาน WPVC เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความขุ่นของน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคคอลลอยด์ของไม้เกิดการหลุดออกจากเนื้อไม้ และสารให้สีของไม้เกิดการละลายออกได้ง่ายขึ้น เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นส่งผลทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสของพีวีซีและไม้อ่อนแอลง มีผลทำให้สารที่สามารถละลายน้ำได้ในเนื้อไม้หลุดออกได้ง่ายยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณถึงเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมควบคุมมลพิษ พบว่า น้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ยังคงไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานซึ่งมีค่าอยู่ที่ไม่เกิน 50 NTU [30]



รูปที่ 23 ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และWPVC ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน



รูปที่ 24 ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และWPVC ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน



รูปที่ 25 ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซี และWPVC ที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน

4.4 ลักษณะสีของน้ำ

ตารางที่ 3 แสดงสีของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส สังเกตพบว่า กรณีการแช่ชิ้นงานพีวีซี สีของน้ำไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่การแช่ชิ้นงาน WPVC พบว่า สีของน้ำมีแนวโน้มเปลี่ยนไปเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานนานขึ้น โดย ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สีของน้ำสามารถสังเกตเห็นเป็นสีน้ำตาลอ่อน เมื่อน้ำผ่านการแช่ชิ้นงาน WPVC เป็นเวลา 120 ชม. หรือ 5 วัน และ ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สังเกตพบว่า สีของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน โดยพบว่า สีของน้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ผลข้างต้นสอดคล้องกับคำอธิบายเรื่องความขุ่นของน้ำ

ตารางที่ 3 ลักษณะสีของน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กัน

	24 ชม.	72 ชม.	120 ชม.
พีวีซี			
WPVC			

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาผลของการปลดปล่อยสารเคมีที่มาจากวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ หรือ WPVC ที่มีผลต่อคุณภาพน้ำ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีชิ้นงานพีวีซี จากผลการวิจัย พบว่า การปลดปล่อยของสารเคมีและสารที่มีอยู่ในพีวีซีและผงไม้จากชิ้นงาน WPVC และพีวีซีอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย โดยพิจารณาจากค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความขุ่นของน้ำ เพราะค่าที่วัดได้จากน้ำตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำทิ้งจากกรมควบคุมมลพิษ ค่า pH มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยทั้งกรณีพีวีซีและWPVC ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารเคมีที่มีอยู่ในสูตรของพีวีซี หรือสารรมยาในไม้เกิดการหลุดออกจากชิ้นงาน ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงาน หรืออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นกรณีของการแช่ชิ้นงาน WPVC ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นไปทำลายแรงยึดเกาะระหว่างเฟสของไม้และพีวีซีจึงอาจมีผลทำให้ไอออนของโลหะที่มาจากสารเติมแต่งของพีวีซีหลุดออกมาอยู่ในน้ำได้ง่ายขึ้น ส่วนค่าความขุ่นและสีของน้ำ พบว่า สำหรับชิ้นงาน WPVC น้ำมีความขุ่นและสีเข้มมากขึ้นเมื่อเวลาการแช่ชิ้นงานนานขึ้น หรืออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคคอลลอยด์ของไม้เกิดการหลุดออกจากเนื้อไม้ และสารให้สีของไม้เกิดการละลายออกได้ง่ายขึ้น เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงาน หรืออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ในขณะที่พีวีซี ความขุ่นและสีของน้ำไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการแช่ชิ้นงาน หรือเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ

เอกสารอ้างอิง

1. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, "Stabilizations of molecular structures and mechanical properties of PVC and wood/PVC composites by Tinuvin and TiO_2 stabilizers", **Polymer Engineering and Science**, **Vol. 51**, pp. 1354-1365.
2. Stark, N.M. and Matuana, L.M., 2007, "Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS", **Polymer Degradation and Stability**, **Vol. 92**, pp. 1883-1890.
3. Bledzki, A.K., Letman, M., Viksne, A. and Rence, L., 2005, "A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites", **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. **36**, pp. 789-797.
4. Bledzki, A.K., Letman-Sakiewicz, M. and Murr, M., 2010, "Influence of static and cyclic climate condition on bending properties of wood plastic composites (WPC)" **Express Polymer Letters**, Vol. **4**, pp. 364-372.
5. Fabiyi, J.S. and McDonald, A.G., 2010, "Physical morphology and quantitative characterization of chemical changes of weathered PVC/pine composites", **Journal of Polymer and the Environment**, **Vol. 18**, pp. 57-64.
6. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C., and Thongsang, S., 2003, "Effect of wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites", **Polymer International**, Vol. 52, pp. 1847-1855.
7. Sombatsompop, N., and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of moisture content on mechanical properties, thermal and structural stability, and extrudate texture of PVC/wood sawdust composites", **Polymer International**, Vol. 54, pp. 1210-1218.

8. Ge, X.C., Li, X.H., and Meng, Y.Z., 2004, "Tensile properties, morphology, and thermal behavior of PVC composites containing pine flour and bamboo flour", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 93, pp. 1804-1811.
9. Augier, L., Sperone, G., Vaca-Garcia, C., and Borredon, M.E., 2007, "Influence of the wood fibre filler on the internal recycling of poly(vinyl chloride) based composites", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 92, pp. 1169-1176.
10. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K., and Sombatsompop, N., 2007, "Mechanical characterization of E-chopped strand glass fiber reinforced wood/PVC composites", **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, pp. 535-550.
11. Titow, W.V., 1990, **PVC Plastics: Properties, Processing and Applications**, Elsevier Applied Science, New York, pp. 62-333.
12. Gächter, R. and Müller, H., 1990, **Plastics Additives Handbook**, Hanser Publishers, New York, pp. 271-281, 423-438, 525-535.
13. http://www.specialchem4polymers.com/tc/mbs-impact-modifiers/index.aspx?id
14. Owen, E.D., 1984, **Degradation and stabilization of PVC**, Elsevier Applied Science Publishers, New York, pp. 21-68.
15. Stranes, Jr. W.H., 2002, "Structural and Mechanistic Aspects of the Thermal Degradation of Poly(vinyl chloride)", **Progress in Polymer Science**, Vol. 27, pp. 2133-2170.
16. Sjöström, E., 1993, **Wood Chemistry Fundamentals and Application**, 2nd ed., Academic Press, INC., New York, pp. 55-89.
17. Blezzki, A.K. and Gassan, J., 1999, "Composites Reinforced with Cellulose based Fibres", **Progress in Polymer Science**, Vol. 24, pp. 221-274.
18. Kirk and Othmer, 1998, **Encyclopedia of Chemical Technology**, Vol. 25, 4th ed., John Wiley & Sons, INC., pp. 627-647.

19. Rowell, R.M., 2005, **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, Chapter 3, CRC Press, Danvers, pp. 1-12.
20. Mathews, F.L. and Rawlings, R.D., 1994, **Composite Materials: Engineering and Science**, Chapman & Hall, Oxford, pp. 29-64.
21. http://dmsc2.dmsc.moph.go.th/webroot/BQSF/File/file_pdf/การประชุมเชิงปฏิบัติการข้าว%204%20พ.ย.%2056/การรมยากำจัดศัตรูพืช.pdf
22. **หนังสือความรู้สิ่งเป็นพิษตอนที่ 8**, 2536 กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข หน้า 1-6.
23. ปราโมช เชี่ยวชาญ, 2552, "น้ำดื่มในสถานประกอบการ/โรงงานอุตสาหกรรม ตอนที่ 3- คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี", **จุลสารสาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ**, ฉบับที่ 3, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
24. คงศักดิ์ แสงพวง, **ลักษณะของน้ำเสีย**, สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 8 (http://www.envwest.com/km/data/018-km_reo8.pdf/ลักษณะของน้ำเสีย)
25. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2536, **แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ,** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. Halouyi, A. and Vergnaud, J.M., 1997, "Study of the Release in Water of Chemicals Used for Wood Preservation. Effect of Wood Dimensions", **Wood Science and Technology**, Vol. 31, pp. 51-62.
27. Schäfer, M. and Roffael, E., 2000, "On the Formaldehyde Release of Wood", **Holz als Roh-und Werkstoff**, Vol. 58, pp. 259-264.
28. Fabbricino, M., Panico, A. and Trifuoggi, M., 2005, "Copper Release in Drinking Water due to Internal Corrosion of Distribution Pipes", **Global NEST Journal**, Vol. 7, pp. 163-171.
29. Chinhanga, J.R., 2010, "Impact of Industrial Effluent from an Iron and Steel Company on the Physico-chemical Quality of Kwekwe River Water in Zimbabwe", **International Journal of Engineering, Science and Technology**, Vol. 2, pp. 129-140.

30. Ijeoma, K. and Achi, O.K., 2011, “Industrial Effluent and Their Impact of Water Quality of Receiving Rivers in Nigeria”, **Journal of Applied Technology in Environmental Sanitation**, Vol. 1, pp. 75-86.

31. **มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง** จากกรมควบคุมมลพิษ (http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html)