



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

ไฮโดรเจลจากแป้งเม็ดทุเรียนสำหรับกำจัดสีย้อมที่เป็นอันตราย

Hydrogel based on durian seed starch with potential for hazardous dye removal

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. วารินทร์ พิมพา

ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร

คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

นายจักรกฤษณ์ พิมพา

ฝ่ายปฏิบัติการภาคเหนือ พิษณุโลก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน...ค. - ม.ค. ๒๕๕๘
เลขทะเบียน... 1.6689188
เลขเรียกหนังสือ... ๖ ๑๕

๑๘.๗

๑๔๘๗

๒๕๖๗

สนับสนุนโครงการโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

งบประมาณแผ่นดิน ปี 2556

ไฮโดรเจลจากแป้งเม็ดทุเรียนสำหรับกำจัดสีย้อมที่เป็นอันตราย

รองศาสตราจารย์ ดร. วารินทร์ พิมพา¹

นายจักรกฤษณ์ พิมพา²

¹ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

²ฝ่ายปฏิบัติการภาคเหนือ พิษณุโลก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาการเตรียมคอมโพสิตไฮโดรเจลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากแป้งเม็ดทุเรียนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการดัดแปลงโดยอาศัยการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ด้วยกอลลูตาราลดีไฮด์ และตรวจวัดสมบัติการพองตัวและโครงสร้างของไฮโดรเจลด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อนำไปใช้สำหรับศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ที่เป็นอันตรายที่เป็นอันตรายในสารละลายน้ำ โดยใช้เมทิลีนบลูและแอซิดออเรนจ์ 8 เป็นตัวแทนของสีย้อมแคทไอออนิกและแอนไอออนิกตามลำดับ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจล ได้แก่ ปริมาณแป้งเม็ดทุเรียนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เป็นองค์ประกอบ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม และเวลาที่ไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อมด้วยวิธีการทดลองแบบกะ และจากการวิเคราะห์รูปแบบของการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลโดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์ทั้งแบบอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม พบว่าข้อมูลของการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดมีความสัมพันธ์กับแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองเทียมมากกว่า

เมื่อใช้ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วยแป้งเม็ดทุเรียนร้อยละ 3 จะมีประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่พีเอช 7 และแอซิดออเรนจ์ที่พีเอช 2.5 เท่ากับ 3.411 และ 3.274 มิลลิกรัมต่อกรัมของไฮโดรเจลตามลำดับ โดยมีจลนศาสตร์ของการดูดซับที่สอดคล้องกับแบบอันดับสองเทียม จะเห็นได้ว่าไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH สามารถใช้ได้ดีสำหรับการกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ในสารละลายน้ำแม้ว่าจะมีความเข้มข้นต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

คำสำคัญ : ไฮโดรเจล ตัวดูดซับ น้ำทิ้ง สีย้อมสังเคราะห์ แป้งเม็ดทุเรียน

Hydrogel based on durian seed starch with potential for hazardous dye removal

Assoc. Prof. Dr. Warin Pimpa¹

Chakkrit Pimpa²

¹Department of Agro-Industry, Faculty of Agriculture, Natural Resource and Environment, Naresuan University

² Northern Region Operation Division, Electricity Generating Authority of Thailand

In the present investigation, attempts have been made to explore for (1) the development and characterization the environment friendly durian seed starch/polyvinyl alcohol (DSS/PVOH) composite hydrogels modified by chemical cross-linking with glutaraldehyde and (2) the assessment of the adsorption potential of the DSS/PVOH composite hydrogels for the removal of the both cationic and anionic synthetic dyes from aqueous solution. The hydrogels were characterized by swelling behavior and scanning electron microscope (SEM). Methylene blue (MB) and acid orange 8 (AO8) dyes were used as compounds representative of the cationic and anionic dye contaminants, respectively, to evaluate the dye sorption properties of the DSS/PVOH composite hydrogel. The effect of DSS and PVOH contents, initial dye solution pH and contact time on the adsorption capacity was studied conducting batch experiment system. The adsorption was analyzed using pseudo-first order and pseudo-second order kinetic models and pseudo-second order model provided the best correlation of the experimental data.

Adsorption capacity is highly dependent on the pH of the initial dye solution. The adsorption capacities of the DSS/PVOH composite hydrogels in dye solution at initial pH 2.5, 7.0 and 10.0 were observed. It was finding that the hydrogels consisting 3% DSS has optimum adsorption capacity of 3.411 mg/g (for methylene blue under the condition of pH 7.0) and 3.274 mg/g (for acid orange 8 under the condition of pH 2.5) at 24 h of contact time. Hence, for highly efficient adsorption of dyes, pH should be properly controlled depending on the characteristics of the target sorbent and dye. The findings show that DSS/PVOH composite hydrogels can be an alternative use for removal of the synthesis dyes from wastewater which is effective even for low dye concentrations, below 10 mg/l.

Keywords: Hydrogel, superabsorbent, wastewater, synthetic dyes, durian seed starch

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย กองบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัย
นเรศวร งบประมาณแผ่นดินปี 2556



สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	1
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	2
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญเรื่อง	4
สารบัญรูปภาพ	6
สารบัญตาราง	11
บทที่ 1 บทนำ	12
- ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	12
- วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	13
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	13
บทที่ 2 การทบทวนเอกสารงานวิจัย	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	18
- การสกัดและการแยกแ่งจากเม็ดทุเรียน	18
- การวิเคราะห์สมบัติของแ่งเม็ดทุเรียน	18
- การเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	19
- การศึกษาออร์โฟโลยีของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	19
- การศึกษาสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	20
- การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	20
- การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	21
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการวิจัย	22
- การสกัดและสมบัติของแ่งจากเม็ดทุเรียน	22
- การเตรียมและลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	25
- สมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	28
- ออร์โฟโลยีของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	35
- ประสิทธิภาพการดูดซับสีของเมทิลีนบลูของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	40
- ผลของปริมาณพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของไฮโดรเจล	47
- ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู	50

- ผลของความเข้มข้นของสารเชื่อมขวาง	52
- ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมแอซิดออร์แกนิก 8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	54
- จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	66
บรรณานุกรม	69



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่างเม็ดยาเม็ดที่ไว้เพื่อสกัดแยกแยมัง	23
รูปที่ 2 scanning electron micrograph ของแยมังเม็ดที่ไว้	24
รูปที่ 3 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5% DSS	26
รูปที่ 4 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5% DSS ของไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้งโดยผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน และไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัวโดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสภาวะสมดุล	26
รูปที่ 5 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5% DSS ของไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้งโดยผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ในสภาพบรรยากาศ และไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัวโดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสภาวะสมดุล	27
รูปที่ 6 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 5-15%PVOH ของไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้งโดยผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ในสภาพบรรยากาศ และไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัวโดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสภาวะสมดุล	27
รูปที่ 7 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%PVOH และ 10% PVOH ที่ปริมาณสารเชื่อมขวางกลูตารัลดีไฮด์ 1-2% ของไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้งโดยผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ และไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัวโดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสภาวะสมดุล	28
รูปที่ 8 ค่าอัตราการพองตัว (SR) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS เมื่อผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบด้วยลมร้อน และที่อุณหภูมิห้อง	31
รูปที่ 9 ค่าอัตราการพองตัว (SR) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 3% DSS ที่ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ 1-2% เมื่อผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง	33
รูปที่ 10 ค่าอัตราการพองตัว (SR) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS ที่ปริมาณ PVOH 10 และ 15% เมื่อผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง	34
รูปที่ 11 SEM image ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน	36
รูปที่ 12 SEM image ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS ที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ	37
รูปที่ 13 เปรียบเทียบ SEM image ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น	38

- 10%PVOH และ 0-5%DSS ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน และที่อุณหภูมิห้อง
ในสภาพบรรยากาศ
- รูปที่ 14 SEM image ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 38
3% DSS ที่ใช้กักตุนสารละลายที่มีความเข้มข้น 1-1.5% ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน
- รูปที่ 15 SEM image ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 39
3% DSS ที่ใช้กักตุนสารละลายที่มีความเข้มข้น 1-1.5% ที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
- รูปที่ 16 SEM image ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 39
10-15% PVOH ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน
- รูปที่ 17 SEM image ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 40
10-15%PVOH ที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ
- รูปที่ 18 (a) การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย MB ในสภาวะที่สารละลาย MB มีความเข้มข้นเริ่มต้น 42
 2×10^{-5} M (pH 7.0) และน้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลที่แน่นอนประมาณ 10 มก.
- รูปที่ 19 ผลของ pH ของสารละลาย MB ต่อการดูดซับสีของบนไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH 43
ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
ในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อม
เป็นเวลา 0-24 ชั่วโมง
- รูปที่ 20 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 44
10%PVOH ต่อการดูดซับสีของ MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ
โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อมเป็นเวลา 0-24 ชั่วโมง
- รูปที่ 21 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 45
3%DSS ต่อการดูดซับสีของ MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ
โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อมเป็นเวลา 0-24 ชั่วโมง
- รูปที่ 22 ผลของความเข้มข้นของสารเชื่อมขวางที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH 46
ที่ประกอบด้วย 3%DSS และ 10%PVOH ต่อการดูดซับสีของ MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้
แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับ
สารละลายสีย้อมเป็นเวลา 0-24 ชั่วโมง
- รูปที่ 23 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพ 48
การดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS และอยู่ใน
สารละลาย MB ที่มี pH 7.0
- รูปที่ 24 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพ 48
การดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS และอยู่ใน
สารละลาย MB ที่มี pH 7.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- รูปที่ 25 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อ 49

- ประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 5-15%PVOH และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0
- รูปที่ 26 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 5-15%PVOH และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 49
- รูปที่ 27 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย MB ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10%PVOH และสารละลาย MB ที่มี pH เริ่มต้น 2.5, 7.0 และ 10.0 51
- รูปที่ 28 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย MB ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10%PVOH และสารละลาย MB ที่มี pH เริ่มต้น 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 51
- รูปที่ 29 ผลของความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางในกระบวนการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0 53
- รูปที่ 30 ผลของความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางในกระบวนการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 53
- รูปที่ 31 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู (MB) และแอซิดออเรนจ์ 8 (AO₈) 54
- รูปที่ 32 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย AO₈ ในสถานะที่สารละลาย AO₈ มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2×10^{-5} M ที่เวลาเริ่มต้น และเมื่อเวลาที่ให้ไฮโดรเจลดูดซับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในสารละลาย AO₈ ที่มี pH 2.5 7.0 และ 10.0 55
- รูปที่ 33 ผลของ pH ของสารละลาย AO₈ ต่อการดูดซับสีย้อมบนไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลอยู่สัมผัสกับสารละลายสีย้อมเป็นเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง 56
- รูปที่ 34 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 10%PVOH ต่อการดูดซับสีย้อม AO₈ บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลอยู่สัมผัสกับสารละลายสีย้อมเป็นเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง 57
- รูปที่ 35 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 57

- 3%DSS ต่อการดูดซับสีย้อม MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อมเป็นเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง
- รูปที่ 36 ผลของความเข้มข้นของสารเชื่อมขวางที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 3%DSS และ 10%PVOH ต่อการดูดซับสีย้อม MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อมเป็นเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง 58
- รูปที่ 37 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS และอยู่ในสารละลาย AO_8 ที่มี pH 2.5 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO_8 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 59
- รูปที่ 38 การเปรียบเทียบผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS และอยู่ในสารละลาย MB และ AO_8 ที่มี 7.0 และ pH 2.5 ตามลำดับ เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับสีย้อมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 59
- รูปที่ 39 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย AO_8 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10%PVOH และสารละลาย AO_8 ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0 60
- รูปที่ 40 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย AO_8 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10%PVOH และสารละลาย AO_8 ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO_8 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 60
- รูปที่ 41 การเปรียบเทียบผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อประสิทธิภาพการดูดซับของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10%PVOH และสารละลาย MB และ AO_8 ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับสีย้อมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 61
- รูปที่ 42 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 5-15%PVOH และอยู่ในสารละลาย AO_8 ที่มี pH 2.5 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO_8 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 62
- รูปที่ 43 ผลของความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางในกระบวนการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และอยู่ในสารละลาย AO_8 ที่มี pH 2.5 62

มือให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 44 กราฟของแบบจำลองการดูดซับ MB ที่มีจลนศาสตร์แบบ pseudo-second-order
ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 0-5%DSS 64

รูปที่ 45 กราฟของแบบจำลองการดูดซับ AO_8 ที่มีจลนศาสตร์แบบ pseudo-second-order
ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 3%DSS
เมื่อใช้สีย้อมที่มี pH เริ่มต้นเป็น 2.5 และ 10.0 65



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบและสมบัติของแป้งเม็ดทุเรียน	23
ตารางที่ 2 ค่าอัตราการพองตัวที่สภาวะสมดุล (SR_{eq}) และปริมาณน้ำที่สภาวะสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ (0-5%) DSS	32
ตารางที่ 3 ค่าอัตราการพองตัวที่สภาวะสมดุล (SR_{eq}) และปริมาณน้ำที่สภาวะสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ 3% DSS โดยใช้กลูตาราลดีไฮด์ 1-2% เมื่อผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง	33
ตารางที่ 4 ค่าอัตราการพองตัวที่สภาวะสมดุล (SR_{eq}) และปริมาณน้ำที่สภาวะสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ 3% DSS และผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง	34
ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ (0-5%) DSS	64
ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของการดูดซับ AO_8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ 3% DSS เมื่อใช้สีย้อมที่มี pH เริ่มต้นเป็น 2.5 และ 10.0	65

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyes) เป็นสารปนเปื้อนในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น กระดาษ พลาสติก เครื่องหนัง ยา อาหาร เครื่องสำอาง สิ่งทอ สิ่งพิมพ์ ยา ย้อมผมแบบชั่วคราว และอื่น ๆ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มีสี จึงทำให้เกิดน้ำทิ้งที่มีสีปริมาณมากเกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ ถึงแม้ว่าจะมีการปนเปื้อนของสีย้อมในความเข้มข้นต่ำมาก แต่ก็ยังทำให้น้ำทิ้งมีสีที่สังเกตเห็นได้และนอกจากจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยจัดเป็นมลภาวะทางสุนทรียศาสตร์ (aesthetic pollution) ยังเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) และการรบกวน (perturbation) ต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (Bubacz et al, 2010) น้ำทิ้งที่ออกจากอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมเหล่านี้เมื่อลงสู่แม่น้ำลำคลองโดยไม่ได้ผ่านการบำบัดอย่างเหมาะสม จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศในแหล่งน้ำ ดังนั้นการกำจัดสีย้อมที่เป็นพิษออกจากน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมดังกล่าวจึงเป็นงานท้าทายที่ควรได้รับความสนใจ เนื่องจากการยากที่จะบำบัดน้ำทิ้งโดยอาศัยกระบวนการแบบดั้งเดิม (conventional methods) การบำบัดน้ำทิ้งที่มีสีย้อมปนเปื้อนค่อนข้างยุ่งยาก เพราะโมเลกุลสีย้อมเสถียรต่อแสงและถูกย่อยสลายได้ยากในสภาวะที่มีอากาศ (aerobic digestion) ทำให้อัตราการกำจัดสารเหล่านี้ในระหว่างกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ (aerobic waste treatment) เกิดได้ช้า (Garg et al. 2003)

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาไฮโดรเจลที่สามารถย่อยสลายได้และมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมสังเคราะห์ เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับใช้กำจัดสีย้อมสังเคราะห์โดยอาศัยเทคโนโลยีการดูดซับ (adsorption technology) ไฮโดรเจลมีโครงสร้างสามมิติที่เกิดจากการเชื่อมขวางของเครือข่ายพอลิเมอร์ (cross-linked polymer networks) ของโซ่ที่ยืดหยุ่น (flexible chains) จึงทำให้สามารถดูดซับและเหนี่ยวนำน้ำและโมเลกุลของตัวถูกละลายไว้ และเนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันจำพวกไอออนิก (ionic functional group) จึงทำให้มันสามารถดูดซับและดักจับสีย้อมอนินทรีย์ (ionic dyes) ไว้ได้ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสับเซตรสำหรับเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และแป้งเม็ดทุเรียน ซึ่งต่างก็เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติที่ดีในเรื่องของ biocompatibility ไม่มีความเป็นพิษ (nontoxicity) และง่ายต่อการเสื่อมสลายโดยจุลินทรีย์ (susceptibility to microbial degradation) เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ถูกทำลายโดยปัจจัยบางประการ เช่น การย่อยสลายด้วยเอ็นไซม์ของแบคทีเรีย (Spiridon et al. 2008) โครงสร้างของเจลจะถูกทำให้ละลาย จึงลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นภายหลังการใช้ไฮโดรเจลในการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าว

ทุเรียน (Durian) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Durio zibethinud* Murr. เป็นผลไม้ที่เจริญได้ดีในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทั่วไปมักรับประทานผลสดซึ่งมีสัดส่วนเพียงหนึ่งในสามเท่านั้นที่รับประทานได้ ในขณะที่เมล็ดทุเรียนและเปลือกทุเรียนมักเป็นส่วนที่ถูกทิ้ง การที่ผู้วิจัยให้ความสนใจกับแบ่งเมล็ดทุเรียน เนื่องจากเมล็ดทุเรียนเป็นวัสดุเหลือทิ้งปริมาณมากที่ยังไม่มีการใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง อุตสาหกรรมการแปรรูปทุเรียนจะก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งเปลือกทุเรียนและเมล็ดทุเรียนซึ่งจะถูกกำจัดทิ้งเป็นขยะ สำหรับปริมาณเมล็ดทุเรียนมีมากถึงร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าเมื่อเทียบกับเปลือกทุเรียนแล้ว เมล็ดทุเรียนจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณน้อยกว่ามาก แต่เมื่อทิศทางของการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่ (resource recovery) เป็นที่สนใจกันอย่างมาก ในปัจจุบัน การนำเมล็ดทุเรียนมาใช้ประโยชน์จึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณามากกว่าการกำจัดทิ้งเป็นขยะ โดยเฉพาะมีแป้ง (starch) เป็นองค์ประกอบในเมล็ดทุเรียนมากถึงร้อยละ 56 โดยน้ำหนักแห้ง อีกทั้งแป้งที่สกัดจากเมล็ดทุเรียนยังมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมฟิล์มที่บิโอบิคได้ (Pimpa and Pimpa, 2011a,b) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงที่จะเป็นสับสเตรทที่ดีเมื่อนำมาใช้ร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จะช่วยเสริมสมบัติที่ดีของแต่ละพอลิเมอร์ที่เพิ่มความแข็งแรงไปได้สำหรับใช้ไฮโดรเจลดังกล่าวในงานกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ในน้ำทิ้ง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบ่งเมล็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบร่วมกับ PVOH ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมีหมู่ฟังก์ชันคล้ายคลึงกับ PVOH จึงสามารถใช้ร่วมกัน (biocompatible) ได้อย่างดี (Chiellini et al., 1999) เมื่อนำ PVOH มาผสมกับแป้งเมล็ดทุเรียน หมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเมอร์ทั้งสองจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง จึงทำให้เกิดเสถียรภาพของการทำงานร่วมกัน (synergistic stability) ระบบจึงมีความสมบูรณ์ (system integrity) ดีขึ้น (He et al., 2004) และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสม (blended polymers) มาผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมี (chemical surface modification) ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อยู่ในรูปของไฮโดรเจลคอมโพสิต (composite hydrogels) ที่มีสมบัติการพองตัวในน้ำที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยองค์ประกอบของไฮโดรเจลคอมโพสิต ได้แก่ ปริมาณแป้งเมล็ดทุเรียน PVOH และสารเชื่อมขวาง เป็นต้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้สีย้อมแอซิดออเรนจ์ 8 (acid orange 8) และเมทิลีนบลู (methylene blue) เป็นแบบจำลองในการศึกษาสำหรับสีย้อมแอนไอออนิก และแคทไอออนิก ตามลำดับ สีย้อมทั้งสองชนิดต่างก็จัดเป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่มีการใช้กันมากในหลากหลายอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาไฮโดรเจลคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ชีวภาพ 2 ชนิดคือแป้งเมล็ดทุเรียนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol; PVOH) เป็นส่วนผสมหลัก เพื่อนำศึกษาหลักการดูดซับสีย้อมในสารละลายน้ำของไฮโดรเจลเพื่อป้องกันถึงความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้งานจริง ความสำเร็จที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญที่ก่อให้เกิดทางเลือกของการใช้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้ง่าย ราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายที่สภาวะเหมาะสมสำหรับใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (DSS/PVOH composite hydrogels)
2. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสังเคราะห์ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นงานวิจัยที่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจของเม็ดทุเรียนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมแปรรูปทุเรียนจำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีหรือนำไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง จึงจัดเป็นการเสริมสร้างการพัฒนาอย่างยั่งยืน ให้มีทางเลือกของการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากเม็ดทุเรียนเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการสะสมของวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมเกษตร โดยเฉพาะลดปัญหาการเกิดแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักตามธรรมชาติของสารอินทรีย์ หรือการกำจัดโดยการเผาทำลาย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปัญหาโลกร้อนที่กำลังเป็นที่ห่วงใยของประชากรทั่วโลก
2. เป็นการพัฒนากระบวนการผลิตไฮโดรเจลคอมโพสิตจากแป้งเม็ดทุเรียนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสังเคราะห์ที่เป็นพิษได้ดี ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่ก่อให้เกิดความเข้าใจในวิทยาการของเทคโนโลยีสมัยใหม่สำหรับประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลในงานทางสิ่งแวดล้อม เพื่อก่อให้เกิดการพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องจนสามารถประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่ใช้สีย้อมเป็นวัตถุดิบหนึ่งในกระบวนการผลิต
3. เป็นการพัฒนาความรู้ความสามารถของนักวิจัย และสร้างนักวิจัยใหม่ซึ่งเป็นทรัพยากรมนุษย์ที่สำคัญในการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สร้างความเข้มแข็งให้กับระบบกลไกการศึกษา นอกจากนั้นนักวิจัยยังได้เรียนรู้เพื่อพัฒนาการวิจัยสำหรับการใช้เทคโนโลยีภายในประเทศ เพื่อการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาและพัฒนาประเทศต่อไป

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารงานวิจัย

มลภาวะทางน้ำที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์จัดเป็นปัญหาที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่อุตสาหกรรมต่าง ๆ ต้องหาวิธีการที่เหมาะสมและมีต้นทุนต่ำสำหรับการบำบัดน้ำทิ้ง โดยทั่วไปนอกจากโลหะหนัก สารประกอบอะโรมาติกแล้ว สีย้อมก็จัดเป็นสารที่มักพบการปนเปื้อนในแหล่งน้ำเนื่องจากการใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม สาเหตุที่มลภาวะทางน้ำที่เกิดจากการปนเปื้อนสีย้อมมีความสำคัญมากเนื่องจากน้ำทิ้งที่มีสีมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเรื่องของการสังเคราะห์แสง (photosynthesis activity) ของสิ่งมีชีวิตในน้ำ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่น้ำทิ้งเหล่านี้ต้องผ่านกระบวนการบำบัดที่เหมาะสม ในทางปฏิบัติมีวิธีการบำบัดน้ำทิ้งได้หลายวิธี ได้แก่ การบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment) กระบวนการเมมเบรน (membrane processed) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation processes) เทคนิคทางเคมีและเคมีไฟฟ้า (chemical and electrochemical techniques) และการดูดซับ (adsorption procedures) ในระหว่างวิธีการทั้งหมด เทคนิคการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากถ้าสามารถออกแบบกระบวนการดูดซับได้เหมาะสมก็จะให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสูง และมีต้นทุนต่ำ ตัวดูดซับที่ใช้อาจเป็นได้หลายชนิด ได้แก่ แร่ธาตุ สารอินทรีย์ แอกติเวตเต็ดคาร์บอน ซีโอไลต์ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พอลิเมอร์เรซิน เป็นต้น

ปัจจุบันเมื่อทิศทางของเทคโนโลยีสะอาดเข้ามามีบทบาททางสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ทำให้มีความพยายามที่จะพัฒนาตัวดูดซับที่มีราคาถูก มีประสิทธิภาพสูงและย่อยสลายได้ เพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นภายหลังการใช้งาน ไฮโดรเจลเป็นรูปแบบหนึ่งของตัวพาที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นตัวดูดซับ (absorbent) 'ได้ดี' เนื่องจากมีโครงสร้างแบบเครือข่ายสามมิติ (three-dimensional networks) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีหรือแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ มีและสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงสามารถให้โมเลกุลน้ำถูกจับ (trapped) และถูกตรึง (immobilized) อยู่ในที่ว่างของเครือข่ายเจล (Elvira et al., 2002) นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่ดีอื่น ๆ ที่เหมาะสม ได้แก่ ความสามารถในการแพร่ผ่าน (permeability) ของโมเลกุลขนาดเล็ก นุ่มเหนียว (soft consistency) มีแรงตึงผิวหน้าต่ำ (low interfacial tension) ง่ายต่อการทำให้บริสุทธิ์ (facility for purification) และที่สำคัญสามารถคงรูปอยู่ได้ดีแม้อยู่ในสถานะสมดุลที่มีปริมาณน้ำสูง

ความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเป็นผลมาจากหมู่ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic groups) เช่น $-OH$, $-CONH-$, $-CONH_2-$ และ $-SO_3H$ ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดไฮโดรเจล (Peppas and Khare, 1993) และผลจากการกระจายตัวของหมู่เหล่านี้ในโครงสร้างทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำด้วยดีกรีที่แตกต่างกัน โดยอาจดูดน้ำได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักขึ้นกับธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมของสารละลายน้ำ

และองค์ประกอบของพอลิเมอร์ (Peppas, 1991) ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Karadag et al., 1996; Akala et al., 1998; Blanco et al., 1996) ในกรณีของไฮโดรเจลที่มีความสามารถในการดูดซับสูง อาจดูดซับน้ำได้มากถึง 1000 กรัมต่อ 1 กรัมพอลิเมอร์ น้ำที่อยู่ภายในเจลจะยอมให้เกิดการแพร่ผ่านของตัวถูกละลายผ่านเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ที่พองตัว (Paulino et al. 2011)

นอกจากไฮโดรเจลจะมีสมบัติดูดซับน้ำได้ดีแล้ว ยังมีสมบัติการพองตัว (swelling property) ที่ดีแทนที่จะละลายในสารละลายน้ำที่ล้อมรอบมันอยู่ เนื่องจากการเชื่อมขวางของโครงสร้างไฮโดรเจลที่อาจมาจากพันธะโคเวเลนต์ (covalent bonds) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) หรือแรงวานเดอร์วาลส์ (Vander Waals interactions) ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชนแบบเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น (Kamath and Park, 1993) โครงสร้างสามมิติที่เกิดจากการเชื่อมขวางของเครือข่ายพอลิเมอร์ (cross-linked polymer networks) ของโซ่ที่ยืดหยุ่น (flexible chains) จึงทำให้สามารถดูดซับและเหนี่ยวรั้งน้ำและโมเลกุลของตัวถูกละลายไว้ ทั้งปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้ได้มากและโครงสร้างเครือข่ายที่เป็นรูพรุน จึงทำให้โมเลกุลของตัวถูกละลายสามารถแพร่ผ่านโครงสร้างของไฮโดรเจลได้ โครงสร้างของไฮโดรเจลเป็นเครือข่าย (network) ที่ยืดหยุ่นได้ดีแบบสามมิติของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic polymers) ที่สามารถดูดซับของเหลวปริมาณมากที่มันสัมผัสได้ดี

ในทางปฏิบัติส่วนมากไฮโดรเจลมักเตรียมมาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymers) เช่น polyacrylate, polyacrylamide และ polymethacrylates ซึ่งมาจากแหล่งของฟอสซิล (fossil resources) อย่างไรก็ตามถึงแม้ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้จะมีสมบัติที่ดีมาก แต่กลับมีข้อจำกัดเนื่องจากย่อยสลายได้ยาก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของไฮโดรเจลที่เตรียมจากพอลิเมอร์ตามธรรมชาติ อีกทั้งยังให้สมบัติทางชีวภาพ-เคมีที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำทิ้ง และเตรียมได้โดยใช้สภาวะที่ไม่รุนแรง (mild condition) ด้วย ดังนั้นจึงก่อให้เกิดการพัฒนาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ตามธรรมชาติเมื่อไม่นานมานี้ เช่น จาก แป้ง (Seidel et al., 2004; Lawal et al., 2007) เซลลูโลส (Yoshimura et al., 2006) ไฮยาลูโรแนน (hyaluronan) (GHosh et al., 2005) เด็กซ์แทน (dextran) (Ding et al., 2005) และไคโตซาน (chitosan) (Azap et al., 2006)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol; PVOH) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ย่อยสลายได้ (biodegradable) ด้วยจุลินทรีย์และเอ็นไซม์ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ (Chiellini et al., 1999; Spiridon et al., 2008) PVOH จึงเหมาะกับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับเตรียมบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ เพื่อลดการสะสมจากขยะของแข็งจำพวกพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มาจากปิโตรเลียม PVOH เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) และมีความเป็นพิษต่ำ (low-toxicity) จึงได้รับความนิยมสำหรับประยุกต์ใช้งานหลากหลาย โดยเฉพาะเมื่อนำมาผ่านกระบวนการเชื่อมขวางทางเคมี (chemical cross-linking) กับสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (bifunctional compounds) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของพอลิเมอร์ จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติต้านทานการละลายน้ำดีขึ้น รวมทั้งปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์และเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำให้ดีขึ้นด้วย (Hasimi et al., 2008; Krumova et al., 2000; Gohi et al., 2006;

Shafee and Naguib, 2003) จึงน่าจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหมาะสมกับการเป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจล PVOH ทางสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้อาจเนื่องจาก PVOH ค่อนข้างมีราคาแพง ดังนั้นเพื่อทำให้ PVOH มีความเป็นไปได้สำหรับใช้สำหรับกำจัดสีย้อมที่เป็นอันตรายในน้ำทิ้ง จึงนำมาสู่กรอบแนวความคิดของงานวิจัยนี้ ที่เลือกใช้แป้งจากเมล็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบร่วมกับ PVOH ในการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต เพราะเมล็ดทุเรียนเป็นแหล่งของแป้งที่มาจากวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น เช่น แป้งมันหรือแป้งข้าวโพด ที่มักใช้เป็นแหล่งของแป้งที่นิยมใช้งานกันตามปกติ

แป้งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้รับความนิยมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้งานทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีสมบัติที่ดี สามารถย่อยสลายได้ ใช้ร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นได้ เม็ดแป้งตามธรรมชาติ (native starch granules) จะไม่ละลายน้ำ ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ชนิด คือ อะไมเลส (amylase) ประมาณ 20-30% เป็นโซ่ตรงของหน่วย α -1,4-linked-D-glucose มีมวลอยู่ในช่วง $4 \times 10^4 - 1 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$ และอะไมโลเพคติน (amylopectin) เป็นโซ่กิ่งของหน่วย α -1,4-linked-D-glucose ที่เชื่อมต่อกับ α -1,6-linked-D-glucose ในสัดส่วนประมาณ 70-80% มีมวลอยู่ในช่วง $2 \times 10^5 - 1 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ (Jarowenko, 1970) เนื่องจากแป้งมีหมู่ฟังก์ชันเช่นเดียวกับ PVOH จึงทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองสามารถใช้ร่วมกันได้อย่างดี (biocompatible) อีกทั้งแป้งก็ยังสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติได้เช่นกัน

เนื่องจากแป้งมีโครงสร้างที่มาจาก การเชื่อมต่อของแต่ละหน่วยย่อยกลูโคส ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group; -OH) ที่อยู่ด้านนอกของวงแหวน เมื่อนำแป้งและ PVOH มาผสมร่วมกัน (blend) หมู่ไฮดรอกซิลจะเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสอง ส่งผลให้เกิดเสถียรภาพของการทำงานร่วมกัน (synergistic stability) จึงทำให้ระบบมีความสมบูรณ์ (system integrity) ดีขึ้น (He et al., 2004) เพราะ ทั้ง PVOH และแป้งสามารถกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน (disperse homogeneously) ในสารละลายได้ดี Siddaramiah and Somashekar (2003) รายงานว่าเมื่อผสม PVOH เข้ากับแป้งที่ความเข้มข้น 10% จะทำให้ฟิล์มมีค่า tensile strength และ elongation at break เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Mao et al. (2000) ใช้ PVOH เพื่อปรับปรุงสมบัติของ thermoplastic เพื่อแก้ปัญหาความเปราะ (brittleness) โดยเติม PVOH ที่ความเข้มข้น 10% ลงในส่วนผสมของแป้งกับกลีเซอรอล นั่นคือคุณสมบัติ (characteristics) และประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้งานของไฮโดรเจลไม่เพียงแต่ดีขึ้นกับวิธีการเตรียม แต่ยังขึ้นกับชนิดของมอนอเมอร์ (monomers) ที่ใช้เพื่อให้เกิดเครือข่ายของพอลิเมอร์ด้วย (Peppas et. al., 2002)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การสกัดแยกแป้ง (starch) จากเมล็ดทุเรียน

การสกัดแยกแป้งออกจากเมล็ดทุเรียนสามารถทำได้ง่ายโดยดัดแปลงวิธีการให้เหมาะสมกับตัวอย่างเมล็ดทุเรียน ตามวิธีการของ Pimpa et al. (2012) ทำได้โดยจัดซื้อเมล็ดทุเรียนจากโรงงานแปรรูปในเขตจังหวัดในภาคตะวันออก หลังจากขนส่งมาที่ห้องปฏิบัติการ มาปอกเอาเมล็ดออก จากนั้นนำเมล็ดมาล้างทำความสะอาดภายนอกอย่างรวดเร็วด้วยน้ำกลั่น ปอกเปลือกทั้งชั้นนอกและลอกเยื่อหุ้มชั้นในออก และนำมาผ่านกระบวนการสกัดแยกแป้ง โดยนำเมล็ดทุเรียนที่ปอกเปลือกออกแล้วมาปั่นผสมกับสารละลาย 0.5% NaHSO_3 ในสัดส่วน 1:1 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 2 นาที ของเหลวแขวนลอย (slurry) ที่ได้จะนำมาแยกเยื่อใยที่ไม่ละลายน้ำที่เป็นองค์ประกอบในเมล็ดทุเรียนออกโดยบีบผ่านผ้าขาวบาง นำของเหลวสีขาวนมที่ได้มาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อให้เกิดการแยกชั้นของเหลวออกจากของแข็ง กรองของแข็งออกโดยวิธีการ decantation ล้างด้วยน้ำกลั่นและ 80% เอทานอล ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งของแข็งที่ได้มีค่าความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก หลังจากทำให้แห้งแล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิทจนกว่าจะนำมาใช้งานต่อไป

การวิเคราะห์สมบัติของแป้งเมล็ดทุเรียน

1. องค์ประกอบทางเคมี (chemical analysis) ของแป้ง ปริมาณความชื้น (moisture content) วิเคราะห์โดยหาน้ำหนักที่สูญเสีย (weight loss) ตามวิธีการของ Amin et al. (2007) ปริมาณเถ้าทั้งหมด (total ash content) วิเคราะห์ตามวิธีการของ AOAC Official Method 923.03 (AOAC, 1990) ปริมาณโปรตีน และไขมัน วิเคราะห์ตาม AACC method 46-13 และ 30-25 ตามลำดับ (AACC, 1983) และปริมาณอะไมเลส (amylase content) วิเคราะห์โดยใช้ colorimetric method ตามวิธีการของ Juliano B.O. (1971)
2. การตรวจวัดสีของแป้งโดยใช้ Hunter Lab colorimeter รุ่น DP 9000 และใช้ standard plate no C2-38460 ที่มีค่า $Y_{\text{CIE}} 83.21$ $X_{\text{CIE}} 81.26$ และ $Z_{\text{CIE}} 98.77$ สำหรับ calibration เครื่องมือ บันทึกผลด้วยค่าสีเป็น L^* , a^* และ b^* เมื่อ L^* แสดงถึงความสว่าง (degree of the lightness) a^* แสดงถึง greenness/redness และ b^* แสดงถึง blueness/yellowness จากนั้นนำมาคำนวณและรายงานด้วยค่า Hue angle ($H^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$) และ Chroma ($C = a^{*2} + b^{*2}$)^{1/2})

3. ความหนืด (viscosity measurement) ของแป้ง วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA, model 3D; Newport Scientific Pty., New South Wales, Australia) โดยใช้แป้ง 3 กรัม (ความชื้น 14%) ในน้ำ 25 กรัม เป็นสารมาตรฐาน (Newport Scientific Method, 1997) การวิเคราะห์ความหนืดจะให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนถึงอุณหภูมิ 95°C จากนั้นจึงทำให้เย็นอุณหภูมิ 25°C ในสภาวะที่อุณหภูมิห้อง และรายงานผลในรูปของ peak time (°C), pasting temperature (°C), peak viscosity, holding strength และ viscosity after holding at 95°C และ final viscosity at the end of the test (RVU) และคำนวณหาค่า set back และ breakdown โดยใช้ RVA software version 2.1
4. มอร์ฟอโลยีของเม็ดแป้ง (granular morphology) ตรวจสอบด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) รุ่น LEO/1455 Vp โดยเคลือบด้วยทองที่ความหนา 50 นาโนเมตร และตรวจวัดที่ acceleration voltage 10 kV
5. ความโปร่งใส (clarity) ของแป้ง วิเคราะห์ตามวิธีของ Sanchez-Hernandez et al. (2002)
6. ค่า water retention capacity (WRC) วิเคราะห์ตามวิธีการของ Bryant and Hamaker (1997)
7. ค่าการพองตัว (swelling) วิเคราะห์ตามวิธีการของ Sanchez-Hernandez et al. (2002)

การเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเกรดทางการค้า (commercial grade) ที่มีดีกรีไฮโดรไลซิส 95.0-97.0% และน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 77,000-82,000 วิธีการเตรียมไฮโดรเจลปรับปรุงมาจากวิธีการของ Varshosaz and Koopaie (2002) โดยผสม 10% (w/v) PVOH กับ (1, 3 และ 5% w/v) แป้งเม็ดทุเรียน (เมื่อต้องการศึกษาผลของความเข้มข้นของแป้งเม็ดทุเรียน) ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90-95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยทำการคนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นทำสารละลายให้เย็น แล้วผสม 100 กรัมของสารละลายพอลิเมอร์ผสมนี้กับสารละลายกอลลูตาราลดีไฮด์ (1.5% w/v) กอลลูตาราลดีไฮด์ในสารละลายผสมของ 20 กรัมของ 50% เมทานอล 30 กรัมของ 10% กรดอะซิติก และ 10 กรัมของ 1% กรดซัลฟูริก คนสารละลายทั้งหมดให้เข้ากัน เทลงในจานเลี้ยงเชื้อ (petridishes) วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง หลังจากไฮโดรเจลขึ้นรูปแล้วจึงนำมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสารเชื่อมขวางและกรดที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนน้ำที่ใช้แช่ไฮโดรเจลหลายครั้ง นำไฮโดรเจลมาทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าจะได้น้ำหนักคงที่

การศึกษามอร์ฟอโลยี (morphology) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM) โดยตรวจวัดพื้นผิว (surface) และภาคตัดขวาง (cross section) ของไฮโดรเจลด้วย Leo 1455 Vp scanning electron microscope โดยตัดไฮโดรเจลให้มีขนาด 6 มม. X 1 มม. และติดลงบน stub จากนั้นจึงฉาบด้วยทองคำโดยใช้ Sputter coating Sc-7620

การศึกษาสมบัติการพองตัว (swelling behavior) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

สมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการชั่งน้ำหนัก (gravimetric procedure) โดยแช่ตัวอย่างไฮโดรเจลที่แห้งอย่างสมบูรณ์ (completely dried sample) ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนในน้ำกลั่นที่มากเกินไปที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไฮโดรเจลมาแช่น้ำที่พื้นผิวด้วยกระดาษกรอง แล้วชั่งน้ำหนักตามเวลาที่กำหนด รายงานผลในรูปของค่าอัตราการพองตัว (swelling ration; SR) ค่าสมดุลของอัตราการพองตัว (equilibrium swelling ratio; SR_{eq}) และค่าสมดุลปริมาณน้ำ (equilibrium water content; EWC) โดยคำนวณได้จากสมการ (1)-(3) ดังนี้

$$SR = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (1)$$

$$EWC (\%) = \frac{W_{eq} - W_d}{W_{eq}} \times 100 \quad (2)$$

$$SR_{eq} = \frac{W_{eq} - W_d}{W_d} \quad (3)$$

เมื่อ W_d , W_t และ W_{eq} เป็นน้ำหนักของไฮโดรเจลตัวอย่างในสภาวะแห้ง พองน้ำ (swollen) ที่เวลา t และพองน้ำที่สภาวะสมดุล (โดยในที่นี้ใช้เวลา 48 ชั่วโมง) ตามลำดับ โดยแต่ละช่วงเวลาทำการตรวจวัด 3 ซ้ำ แล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาค่าตามสมการข้างต้น

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

ในงานวิจัยนี้โดยใช้เมทิลีนบลู (methylene blue; MB) เป็นแม่แบบของสีย้อมในกลุ่มแคทไอออนิก (cationic dye) และแอซิดออเรนจ์ 8 (acid orange 8) เป็นแม่แบบของสีย้อมในกลุ่มแอนไอออนิก (anionic dye) ทำได้โดยทดสอบการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH แบบ batch equilibrium procedure ซึ่งปรับปรุงมาจากวิธีการของ Dragan and Apopei (2011) โดยใช้ไฮโดรเจลแห้งที่มีน้ำหนักแน่นอนประมาณ 0.01 กรัม นำมาใส่ในสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 2×10^{-5} M ปริมาตร 10.00 มล. (pH 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อต้องการศึกษาผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม) สำหรับการศึกษาจลนศาสตร์ (kinetic study) นำขวดที่บรรจุสารละลายสีย้อม และไฮโดรเจลมาแช่ที่อุณหภูมิ 25°C เก็บตัวอย่างทุกช่วงเวลาตามที่กำหนด โดยกรองไฮโดรเจลออก แล้วนำสารละลายสีย้อมไปตรวจวัดความเข้มข้นที่เหลือหลังถูกดูดซับด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร และ 498 นาโนเมตรสำหรับการตรวจวัดเมทิลีนบลูและแอซิดออเรนจ์ 8 ตามลำดับ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับด้วยไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (4)

$$\text{Adsorption capacity (mg/g)} = \frac{((C_0 - C)V) \times M_D \times 10^3}{W} \quad (4)$$

เมื่อ C_0 และ C เป็นความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายน้ำในหน่วยโมลาริตี (M) ก่อนและหลังจากเกิดการกระทำกับไฮโดรเจลที่พองตัวที่สภาวะสมดุลแล้ว V เป็นปริมาตรของสารละลายสีย้อมหน่วยลิตร (L) W เป็นน้ำหนักของไฮโดรเจลคอมโพสิตแห้งในหน่วยกรัม (g) และ M_D เป็นน้ำหนักโมเลกุลของสีย้อม

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวางแผนการวิจัยเป็นแบบ completely randomized design (CRD) โดยทำการทดลองทำ 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของแต่ละชุดข้อมูล ทุกการทดลองใช้สารเคมีที่มีความบริสุทธิ์สูง (Analytical grade) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการแปรปรวนทางเดียว (One way analysis of variance) โดยใช้โปรแกรม SPSS กรณีที่ผลทดสอบทางสถิติพบนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 จะใช้การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของแต่ละสภาวะการทดลอง สำหรับข้อมูลที่มีความสำคัญจะทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้



บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

การสกัดและสมบัติของแป้งเม็ดทุเรียน

สมบัติ thickening ของเม็ดทุเรียนมาจากไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ในรูปของแป้งที่เป็นองค์ประกอบหลักในเม็ดทุเรียน เม็ดทุเรียนมีลักษณะรีและมีเปลือกสีน้ำตาล เมื่อผ่าออกจะมีเมือก (slime) และเนื้อในสีขาว (รูปที่ 1) เมือกเหล่านี้จะเป็นปัญหาบ้างในขั้นตอนการปอกเปลือกเพื่อนำมาสกัดแป้ง วิธีการการสกัดแป้ง (starch) อย่างง่ายจากเม็ดทุเรียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ผลผลิตแป้งสูงที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนักตามมาตรฐานของ Thailand trade ministry (1993) ปริมาณผลผลิตแป้งที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายที่ใช้ในขั้นตอนไฮโมจิโนเซชันและการกรอง โดยในการทดลองนี้ได้ผลผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักเม็ดทุเรียนสด

ในการทดลองนี้ได้คัดขนาดของเม็ดทุเรียนให้ใกล้เคียงกันโดยมีความยาวอยู่ในช่วง 3.5-4.5 ซม. จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเม็ดทุเรียนตัวอย่างพบว่ามีแป้ง (starch) เป็นองค์ประกอบหลัก ถึงร้อยละ 56.03 ± 0.08 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งน่าจะเป็นแหล่งของแป้งจากเม็ดผลไม้ที่น่าสนใจแหล่งหนึ่ง นอกจากนั้นยังประกอบด้วยโปรตีน ไขมันหยาบ เยื่อใยหยาบ และเถ้า ดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อนำเม็ดทุเรียนมาผ่านกระบวนการแยกกากที่ไม่ละลายน้ำออก จะสามารถลดปริมาณเยื่อใยได้จาก 2.36% โดยน้ำหนักแห้ง เหลือเพียง 0.30% นั่นคือสามารถแยกกากที่ไม่ละลายน้ำได้คิดเป็นร้อยละ 87.29 แต่ก็สูญเสียปริมาณโปรตีน ไขมันและเถ้าไปด้วย โดยแป้งเม็ดทุเรียนที่แยกได้มีสีค่อนข้างขาว (รูปที่ 1) โดยมีค่า L^* ประมาณ 90% และมีค่า a^* เข้าใกล้ศูนย์ ในขณะที่ค่า b^* อยู่ในช่วงของสีเหลืองเล็กน้อย ในขณะที่มีค่า Hue และ Chroma เท่ากับ 87.55 และ 9.14 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีสีเหลืองอ่อนจางและซีด (dull) เมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนมาละลายน้ำและผ่านกระบวนการเจลาติโนเซชันจะให้แป้งสุกที่ไม่มีสี มีลักษณะข้น (thick) เหนียว มีสมบัติยึดติด (cohesive) และโปร่งแสง (translucent)

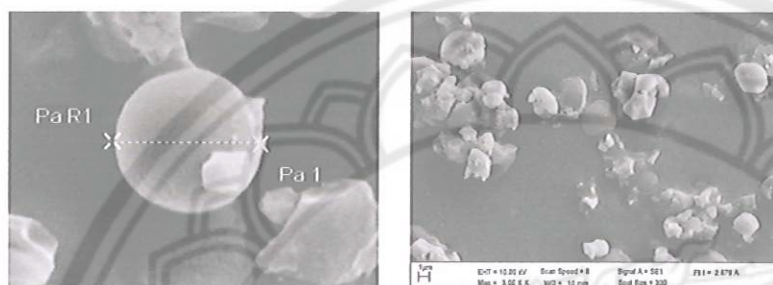


รูปที่ 1 ลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่างเม็ดทุเรียนและแป้งเม็ดทุเรียนที่สกัดแยกได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบและสมบัติของแป้งเม็ดทุเรียน

Composition/Properties (Calculate by dried basis)	
Composition of starch	
Moisture content (%)	12.50±0.09
Protein content (%)	4.71±0.09
Crude fat content (%)	0.27±0.03
Crude fiber content (%)	0.30±0.00
Ash content (%)	2.82±0.08
Amylose content (%)	24.92±0.26
Viscosity	
Peak viscosity (RVU)	65±0
Holding strength (RVU)	61±0
Breakdown (RVU)	91±2
Final viscosity (RVU)	4±0
Peak time (min)	6.79±0.02
Pasting temperature (°C)	83.80±0.28
Setback (RVU)	30±2
Clarity (%T)	0.91±0.08
Color: L*	89.78±0.05
a*	0.39±0.02
b*	9.13±0.01

เมื่อศึกษามอร์โฟโลยีของแป้งเม็ดทุเรียนด้วยเทคนิค SEM พบว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีขนาดเล็กและรูปร่างกลม (rounded shape) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดแป้งอยู่ในช่วง 2-4 ไมโครเมตร (รูปที่ 2) การที่แป้งเม็ดทุเรียนมีขนาดเล็กนับเป็นข้อดีสำหรับการเตรียมเป็นไฮโดรเจลเพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อม เนื่องจากเม็ดแป้งขนาดเล็กจะมีความสามารถในการดูดซับสูง (high adsorbent capacity) (Paredes-Lopez et al., 1989) เมื่อพิจารณาพื้นผิวของเม็ดแป้งของแป้งเม็ดทุเรียน พบว่ามีพื้นผิวเรียบ ไม่มีความผิดปกติหรือการกัดกร่อน (corrosion) บนพื้นผิว แต่พบความเสียหายของเม็ดแป้งบางส่วน ซึ่งเป็นผลจากขั้นตอนการอบ



รูปที่ 2 scanning electron micrograph ของแป้งเม็ดทุเรียน

สมบัติไฮเดรชันของแป้ง (hydration properties) เป็นความสามารถของแป้งที่จะอุ้มน้ำไว้ในเมทริกซ์ เป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของแป้งต่อความเหมาะสมกับการใช้เป็นองค์ประกอบในการเตรียมไฮโดรเจล โดยทั่วไปค่า water retention capacity (WRC) จะเป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถของแป้งในการอุ้มน้ำ ค่า WRC บ่งบอกถึงความสามารถของโปรตีนเมทริกซ์ (protein matrix) ที่จะดูดซับและดักจับน้ำต้านแรงดึงดูด (gravity) เม็ดแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะสามารถดูดซับน้ำและพองตัวเล็กน้อยเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันอัลจำพวกไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ในโครงสร้างของแป้ง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของแป้งจะสั่น (vibrate) รุนแรงมากขึ้น และเกิดการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุล ทำให้ตำแหน่งพันธะไฮโดรเจนดูดซับโมเลกุลน้ำได้มากขึ้น (Fennema, 1985) ค่า WRC ของแป้งเม็ดทุเรียนมีค่าอยู่ในช่วง 1.27 ± 0.06 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ถึง 4.65 ± 0.04 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ 90°C นั่นคือมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นถึง 266% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 90°C

ความจุของการพองตัวของเม็ดแป้ง (swelling capacity; SWC) แสดงถึงการกระทำที่เกิดขึ้นบนไซแป้งระหว่างส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) และผลึก (crystalline) (Takizawa et al., 2004) การละลายของอะไมโลสในระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชันทำให้เกิดการพองตัวของแป้ง นอกจากนั้นความแตกต่างของสมบัติความจุของการพองตัวของแป้งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างไซของแป้งในรูปอสัณฐานกับผลึก ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนของอะไมโลส/อะไมโลเพคติน และลักษณะของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินในเทอมของการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล ดีกรีและความยาวของไซกิ่ง และคอนฟอร์เมชัน (conformation) (Hoover,



2001) ค่า SWC ของแป้งเม็ดทุเรียนอยู่ในช่วง 4.15 ± 0.23 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และ 13.65 ± 0.21 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ 90°C ความจุของการพองตัวของแป้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีการเคลื่อนที่และแพร่ (mobility and diffusion) มากขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับน้ำจำนวนมาก (Bello-Perez et al., 2006) ในการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่า SWC ของแป้งเม็ดทุเรียนถึง 229% เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 50°C เป็น 90°C

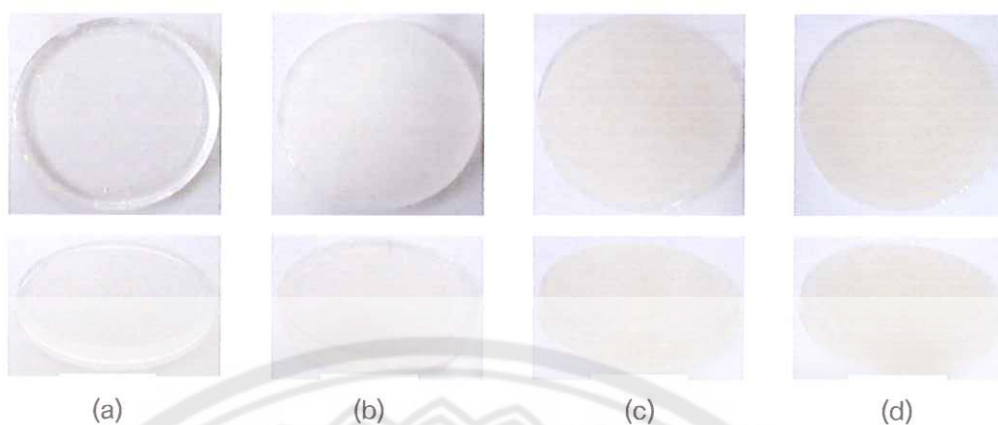
๑ OK
98.7
๖4835
2657

การเตรียมและลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

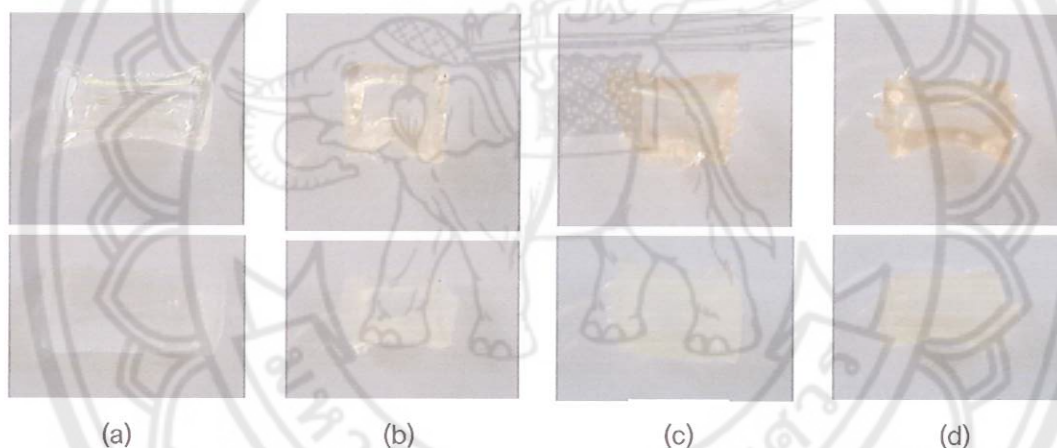
กระบวนการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH สามารถทำได้ง่าย ให้ไฮโดรเจลที่นอกจากจะขึ้นรูปได้ในสภาวะที่อุณหภูมิห้องแล้วยังมีความเสถียรซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย ดังแสดงลักษณะที่ปรากฏในรูปที่ 3 หลังจากนั้นจึงนำมาตัดให้มีขนาดที่ใกล้เคียงแล้วนำไปทำให้แห้ง โดยเมื่อต้องการ

1. ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ทำให้ไฮโดรเจลแห้งต่อสมบัติการพองตัวจะใช้วิธีการทำให้แห้ง 2 แบบ คือ 1) การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C และการทำให้แห้งที่สภาพบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง จะได้ไฮโดรเจลในสภาพแห้งที่มีลักษณะที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4-5
2. ศึกษาถึงผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลต่อสมบัติการพองตัว จะใช้ปริมาณ DSS ที่แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 0, 1, 3 และ 5% จะให้ลักษณะที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4-5
3. ศึกษาถึงผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลต่อสมบัติการพองตัว จะใช้ปริมาณ PVOH ที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 5, 10 และ 15% จะให้ลักษณะที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 6
4. ศึกษาถึงผลของปริมาณกลูตาไรลดีไฮด์ ที่เป็นสารเชื่อมขวางในไฮโดรเจลต่อสมบัติการพองตัว จะใช้ปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 1, 1.5 และ 2% จะให้ลักษณะที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 7

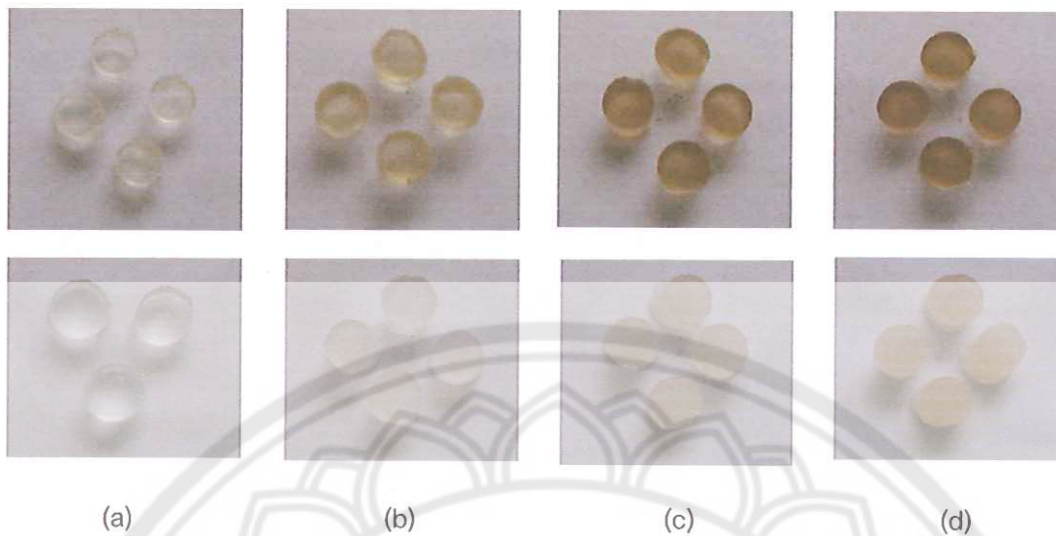
จากลักษณะที่ปรากฏจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ทำให้ไฮโดรเจลแห้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อลักษณะที่ปรากฏ โดยไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่เตรียมได้ก่อนนำไปทำให้แห้งจะมีลักษณะยืดหยุ่นไม่มีสี-ขาวขุ่น สีของไฮโดรเจลขึ้นกับปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบ เมื่อผ่านการทำให้แห้ง ไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยปริมาณ DSS สูงจะมีสีเข้มกว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณ DSS ต่ำกว่า นอกจากนั้นวิธีการทำให้แห้งยังมีผลต่อการหดตัวของโครงสร้างไฮโดรเจล โดยไฮโดรเจลที่ผ่านการอบด้วยลมร้อน ถึงแม้จะใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (50°C) แต่ก็ยังส่งผลต่อโครงสร้างของไฮโดรเจล การระเหยของน้ำที่บรรจุภายในไฮโดรเจลอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างเครือข่ายพอลิเมอร์ภายในไฮโดรเจลมีการล่มสลาย (collapse) ทำให้เมื่อนำไฮโดรเจลแห้งมาแช่น้ำให้พองตัว จึงไม่สามารถคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่การทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจะไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว



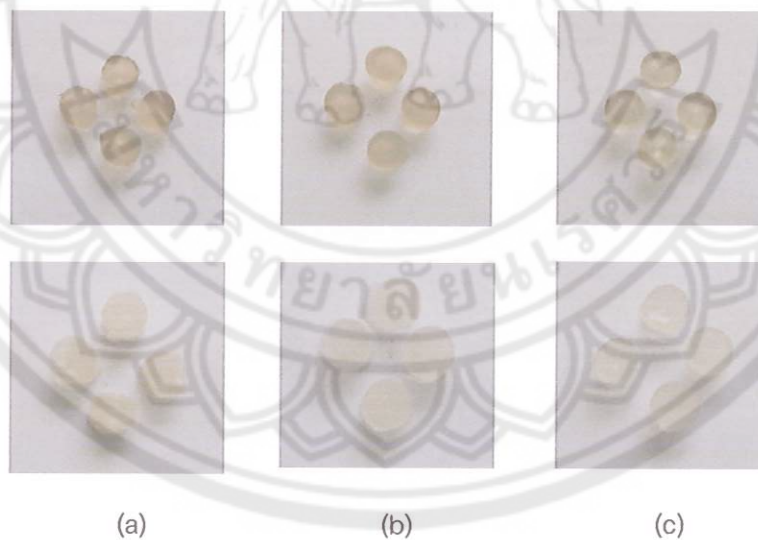
รูปที่ 3 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%



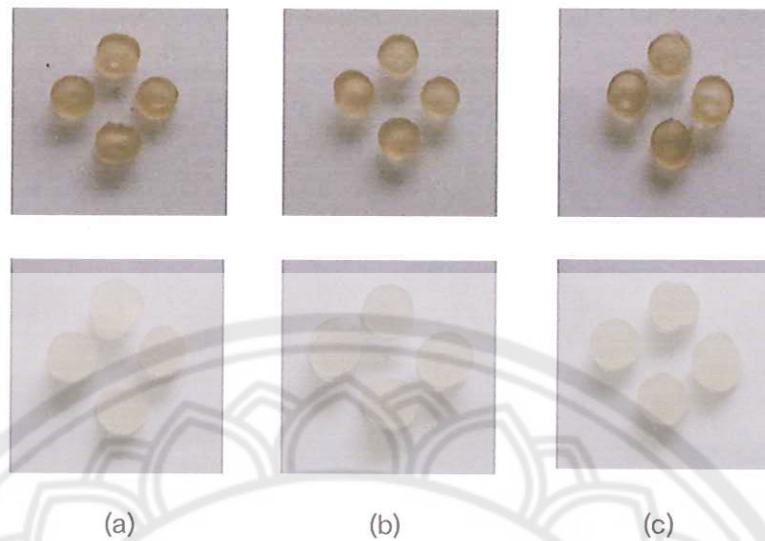
รูปที่ 4 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5% เมื่อ (บน) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้ง (dried state) โดยผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน (hot air-drying) และ (ล่าง) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัว (swollen state) โดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสถานะสมดุล



รูปที่ 5 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5% เมื่อ (บน) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้ง (dried state) โดยผ่านการทำให้แห้งที่สภาพบรรยากาศ (air-drying) และ (ล่าง) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัว (swollen state) โดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสภาวะสมดุล



รูปที่ 6 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ PVOH ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 5%, (b) 10%, (c) 15% เมื่อ (บน) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้ง (dried state) โดยผ่านการทำให้แห้งที่สภาพบรรยากาศ (air-drying) และ (ล่าง) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัว (swollen state) โดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสภาวะสมดุล



รูปที่ 7 ลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%PVOH และ 10% PVOH ที่ปริมาณสารเชื่อมขวางกลูตารัลดีไฮด์แตกต่างกัน (a) 1%, (b) 1.5%, (c) 2% เมื่อ (บน) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้ง (dried state) โดยผ่านการทำให้แห้งที่สภาพบรรยากาศ (air-drying) และ (ล่าง) ไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะพองตัว (swollen state) โดยผ่านการแช่น้ำจนถึงสภาวะสมดุล

สมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

วิธีการทำให้แห้งของไฮโดรเจลเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจล เมื่อศึกษาผลของปริมาณ DSS ต่อค่าอัตราการพองตัว (swelling ratio; SR) ของไฮโดรเจล จะเห็นได้ว่าค่า SR เป็นฟังก์ชันกับเวลาที่ไฮโดรเจลสัมผัสน้ำ ทำได้โดยตรวจวัดการดูดซับน้ำ (water uptake) ที่เวลาต่าง ๆ (t) ที่อุณหภูมิ 25°C ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 8a (เมื่อผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน) และ 8b (เมื่อผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง) เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า SR จะเห็นได้ว่าให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกัน แม้ไฮโดรเจลจะผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยไฮโดรเจล PVOH มีค่า SR ลดลงอย่างมากเมื่อมีการเติมแบ็งเม็ดทุเรียนลงไปเป็นองค์ประกอบร่วม แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH จะมีการพองตัวน้อยกว่าไฮโดรเจล PVOH

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าโครงสร้างที่เป็นเกลียว (helical structure) ของแบ็งเม็ดทุเรียนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากอยู่ด้านนอกของวงแหวน จะเข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะที่แข็งแรงกับ PVOH ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเช่นกัน (Sin et al., 2010) การกระทำระหว่างของหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดทำให้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุล PVOH ลดลง ส่งผลให้ไฮโดรเจล DSS/PVOH มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) ลดลง (Riyajan et al., 2009) นั่นคือเมื่อใช้แบ็งเม็ดทุเรียนมากขึ้น จะทำให้มีจำนวนหมู่ไฮดรอก

ซิลิซิสในเครือข่ายพอลิเมอร์ของไฮโดรเจลลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่า ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีปริมาณ DSS เพิ่มขึ้นจะสมบัติขบน้ำลดลง ส่งผลให้มีสมบัติการพองตัวลดลงด้วย

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhai et al. (2002) ที่เตรียมพอลิเมอร์ไฮโดรเจลจากการผสมของ PVOH และแป้งโดยอาศัยรังสีแกมมาและลำแสงอิเล็กตรอน (electron beam radiation) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าไฮโดรเจลที่ได้มีความแข็งแรงของเจล (gel strength) เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้แป้งร่วมกับ PVOH แต่ก็มีผลทำให้มีการพองตัวลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากอะไมเลส (amylase) ในแป้งที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการพองตัวในทิศทางเดียวกันในไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือเมื่อเติมแป้งเม็ดทุเรียนเพิ่มขึ้น จะทำให้ไฮโดรเจลมีค่าอัตราการพองตัวลดลง แต่ไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่บรรยากาศอุณหภูมิห้อง (air-drying) จะมีการลดลงของค่า SR น้อยกว่าเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบด้วยลมร้อน (hot air-drying) เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจลที่มีการเติมแป้งเม็ดทุเรียนที่ปริมาณเท่ากัน

อิทธิพลของวิธีการทำให้แห้งของไฮโดรเจลต่อสมบัติการพองตัวจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่าปริมาณน้ำที่สภาวะสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่า EWC ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบด้วยลมร้อนจะมีค่าลดลงน้อยกว่าของไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะมีค่า EWC ลดลงประมาณ 18% และ 8% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแป้งเม็ดทุเรียนจาก 0% เป็น 5% สำหรับไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อนและการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงค่าสมดุลของอัตราการพองตัว (equilibrium swelling ratio; SR_{eq}) เมื่อไฮโดรเจลดูดซับน้ำจนถึงสภาวะสมดุล ไฮโดรเจล PVOH มีค่า SR_{eq} ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างไฮโดรเจล PVOH ที่ผ่านการทำให้แห้งทั้ง 2 แบบ แต่จะมีค่า SR_{eq} ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะที่ปรากฏที่ไฮโดรเจล DSS/PVOH ไม่สามารถดูดซับน้ำแล้วคืนตัวอย่างสมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจล PVOH

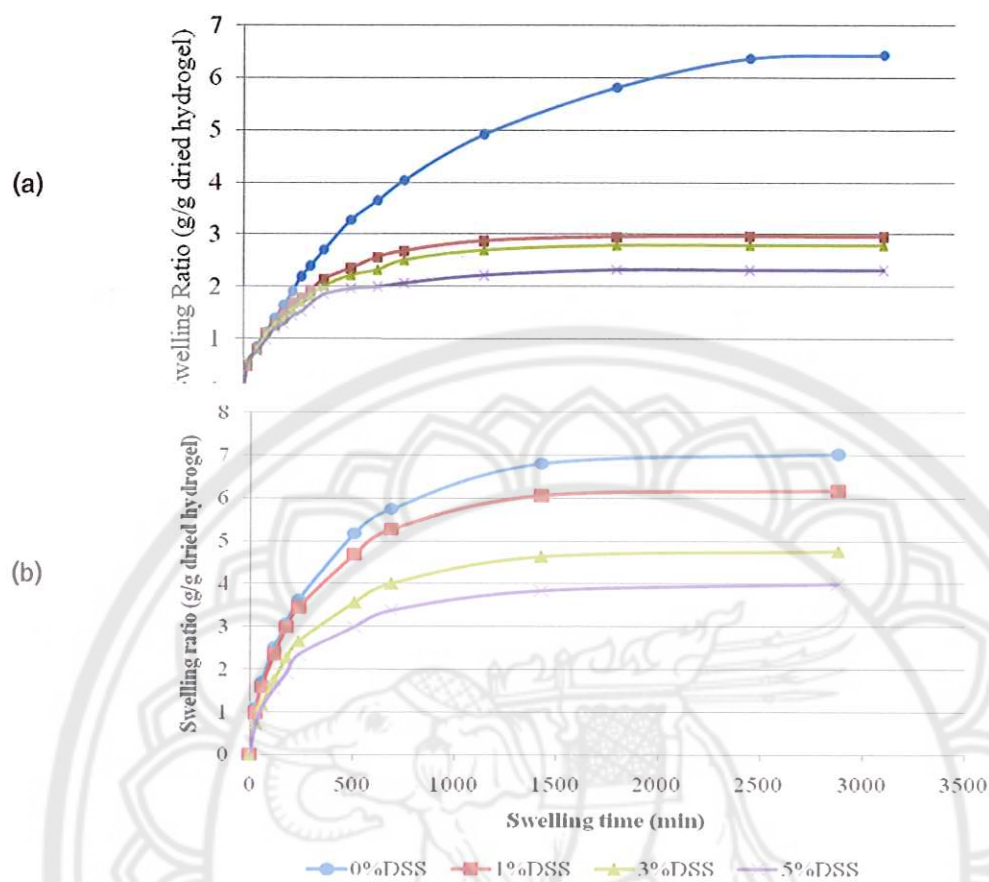
จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งเม็ดทุเรียนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สำคัญซึ่งมีผลกับกลไกการถ่ายโอน (transport mechanism) ของน้ำผ่านเข้าไปภายในไฮโดรเจล ทั้งนี้นอกจากโครงสร้างเครือข่าย (network structure) ที่เกิดขึ้นระหว่าง PVOH กับแป้งเม็ดทุเรียนจะป้องกันการแพร่ผ่านของน้ำจากภายนอกด้วย (interdiffusion) (Xiong et al., 2008) การเข้าน้ำออก (dehydration) และการเกิดขึ้นของพันธะคู่ (double bond) ในโซ่หลักของพอลิเมอร์ ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบมากขึ้นและทำให้มีสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic nature) ลดลง (Hasimi et al. (2008) หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างว่า การลดลงของสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยความร้อนส่วนหนึ่งอาจเป็นผลที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของดีกรีทั้งหมดของรูปลูก (total degree of crystallinity) ซึ่งเป็นส่วนที่โมเลกุลของน้ำจะแพร่ผ่านเข้าไปได้ยากกว่าพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปลูกอสัญฐาน (amorphous) ดังผลการทดลองของ Tanigumi

et al. (1995) ที่รายงานว่าค่าการดูดซับน้ำ (water uptake) ของฟิล์ม PVOH จะลดลงจาก 3.8 g/g เป็น 2 g/g เมื่อความเป็นผลึกของ PVOH เพิ่มขึ้นจากการให้ความร้อนจาก 27% เป็น 45%

ดังนั้นปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของดีกรีทั้งหมดของรูปผลึกของพอลิเมอร์จึงเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดการลดลงของสมบัติการพองตัวของพอลิเมอร์ในน้ำ ซึ่งอาจรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของขนาดผลึก (crystal size distribution) และ ความหนาของ lamella และผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อการผ่อนคลาย (relaxation) ของเฟสอสัญฐาน (amorphous phase) (Park et al., 2001) และความร้อนจะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลทำให้เครือข่ายของเฟสอสัญฐานหนาแน่น (dense) มากขึ้น จึงยากแก่การแพร่ผ่านของโมเลกุลน้ำเข้าสู่ภายในไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบด้วยลมร้อนมากกว่าไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเดียวกัน ด้วยผลการทดลองดังกล่าว ทำให้งานวิจัยในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสังเคราะห์ของไฮโดรเจล DSS/PVOH จึงเลือกใช้ไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในการทดลองถัดไป

ในขณะที่ปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบของไฮโดรเจล (รูปที่ 9 และตารางที่ 3) ส่งผลกระทบต่อสมบัติการพองตัวไม่มากนักเมื่อเทียบกับผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบของไฮโดรเจล โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ PVOH จาก 10% เป็น 15% มีผลให้ไฮโดรเจลมีสมบัติการพองตัวลดลง ดังจะเห็นได้จากมีค่า SR, SR_{eq} และ EWC ลดลงเล็กน้อย (โดยใช้ปริมาณ DSS และกลูตาราลดีไฮด์คงที่ที่ 3% และ 1.5% ตามลำดับ) อีกทั้งยังทำให้สารละลายผสม DSS/PVOH ที่เตรียมไฮโดรเจลมีสภาพข้นหนืด ยากแก่การใช้งานด้วย

สำหรับการใช้กระบวนการเชื่อมขวางทางเคมีด้วยสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (bifunctional compounds) จะสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเมอร์ เป็นวิธีการหนึ่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทำให้ไฮโดรเจลมีการละลายน้ำได้ลดลง อีกทั้งยังช่วยทำให้มีสมบัติทางกลดีขึ้น (Hasimi et al., 2008; Krumova et al., 2000) และปรับปรุงจลนศาสตร์และสมดุลของการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ (Gohi et al., 2006; Shafee and Naguib, 2003) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กลูตาราลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่ามีผลต่อสมบัติการพองตัว โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลูตาราลดีไฮด์ จะทำให้ไฮโดรเจลมีการพองตัวลดลง โดยจะเห็นได้ชัดจากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า SR ที่เวลาต่าง ๆ (รูปที่ 10) และค่า EWC และ SR_{eq} (ตารางที่ 4) โดยการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวาง ทำให้มีความหนาแน่นของเครือข่ายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อการถ่ายโอนของน้ำจากภายนอกเข้าสู่ภายในไฮโดรเจล ไฮโดรเจล DSS/PVOH จึงมีสมบัติการพองตัวลดลง ดังนั้นการใช้ปริมาณสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อสมบัติการดูดซับน้ำ/การพองตัวของไฮโดรเจล

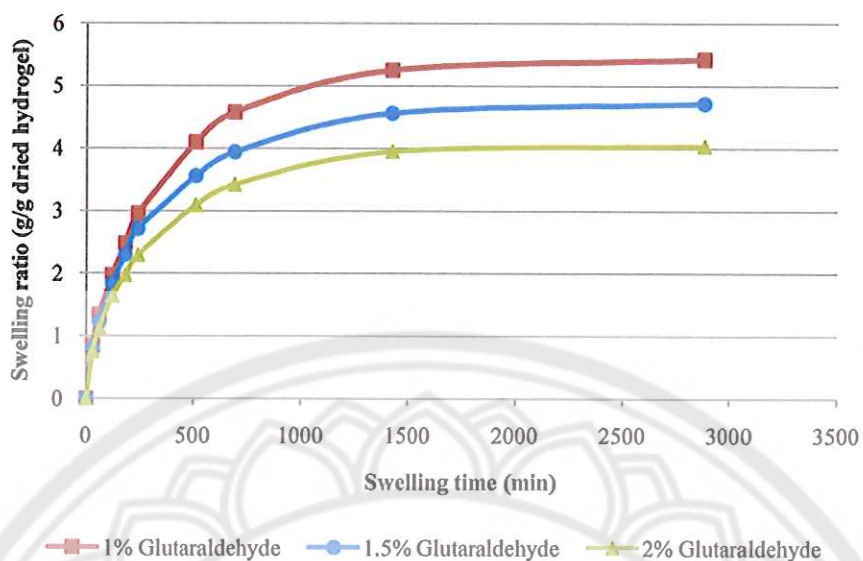


รูปที่ 8 ค่าอัตราการพองตัว (SR) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน (0-5% w/v) เมื่อผ่านการทำให้แห้ง (a) ด้วยการอบด้วยลมร้อน และ (b) ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการพองตัวที่สภาวะสมดุล (SR_{eq}) และปริมาณน้ำที่สภาวะสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ (0-5%) DSS

	DSS content (% w/v)			
	0	1	3	5
Oven-dried hydrogels				
EWC (%)	86.53±0.14	74.71±0.46	73.58±0.45	69.80±0.78
SR_{eq} (g/g dried hydrogel)	6.43±0.10	2.96±0.07	2.79±0.06	2.31±0.09
Air-dried hydrogels				
EWC (%)	87.54±0.34	86.06±0.44	82.61±0.46	79.87±2.00
SR_{eq} (g/g dried hydrogel)	7.03±0.21	6.18±0.23	4.75±0.15	4.00±0.49

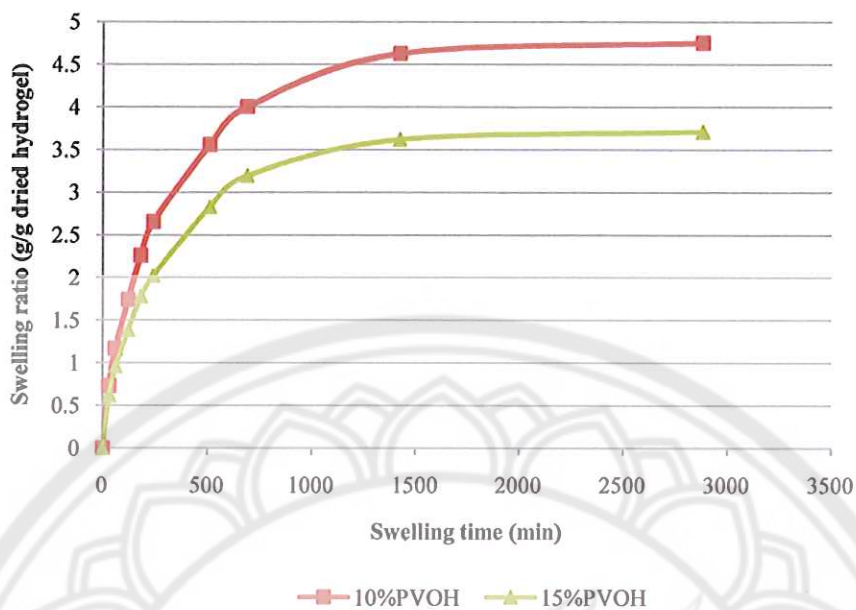




รูปที่ 9 ค่าอัตราการพองตัว (SR) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 3% DSS ที่ปริมาณกลูตาราลดีไฮด์แตกต่างกัน 1-2% เมื่อผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3 ค่าอัตราการพองตัวที่สภาวะสมดุล (SR_{eq}) และปริมาณน้ำที่สภาวะสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ 3% DSS โดยใช้กลูตาราลดีไฮด์ 1-2% เมื่อผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

	Concentration of glutaraldehyde (% w/v)		
	1.0	1.25	1.5
EWC (%)	84.89±2.21	70.38±2.54	68.26±3.89
SR_{eq} (g/g dried hydrogel)	5.75±1.16	4.72±0.30	4.04±0.35



รูปที่ 10 ค่าอัตราการพองตัว (SR) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS ที่ปริมาณ PVOH 10 และ 15% เมื่อผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4 ค่าอัตราการพองตัวที่สภาวะสมดุล (SR_{eq}) และปริมาณน้ำที่สภาวะสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ 3% DSS และผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

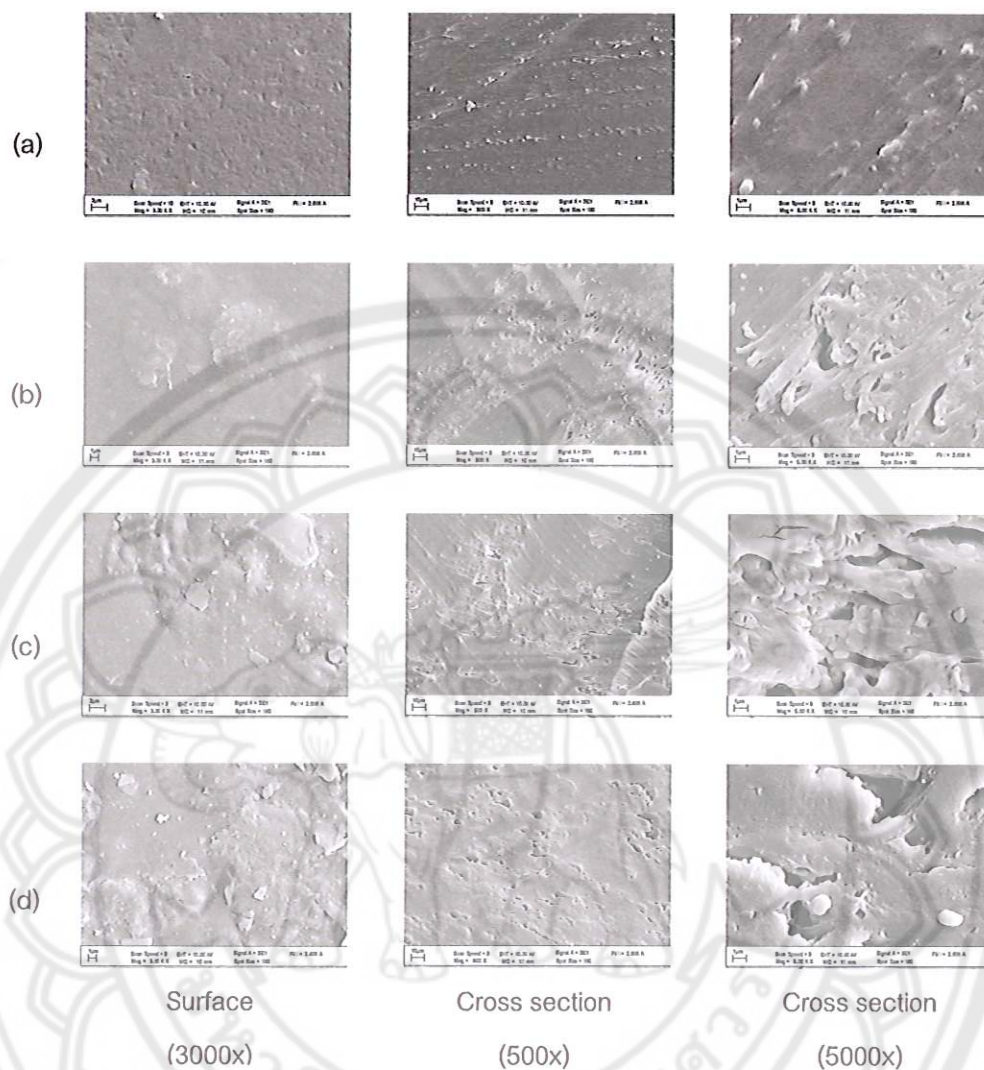
	PVOH content (% w/v)	
	10	15
EWC (%)	82.61±0.46	78.66±1.82
SR_{eq} (g/g dried hydrogel)	4.75±0.15	3.71±0.37

มอร์โฟโลยี (morphology) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

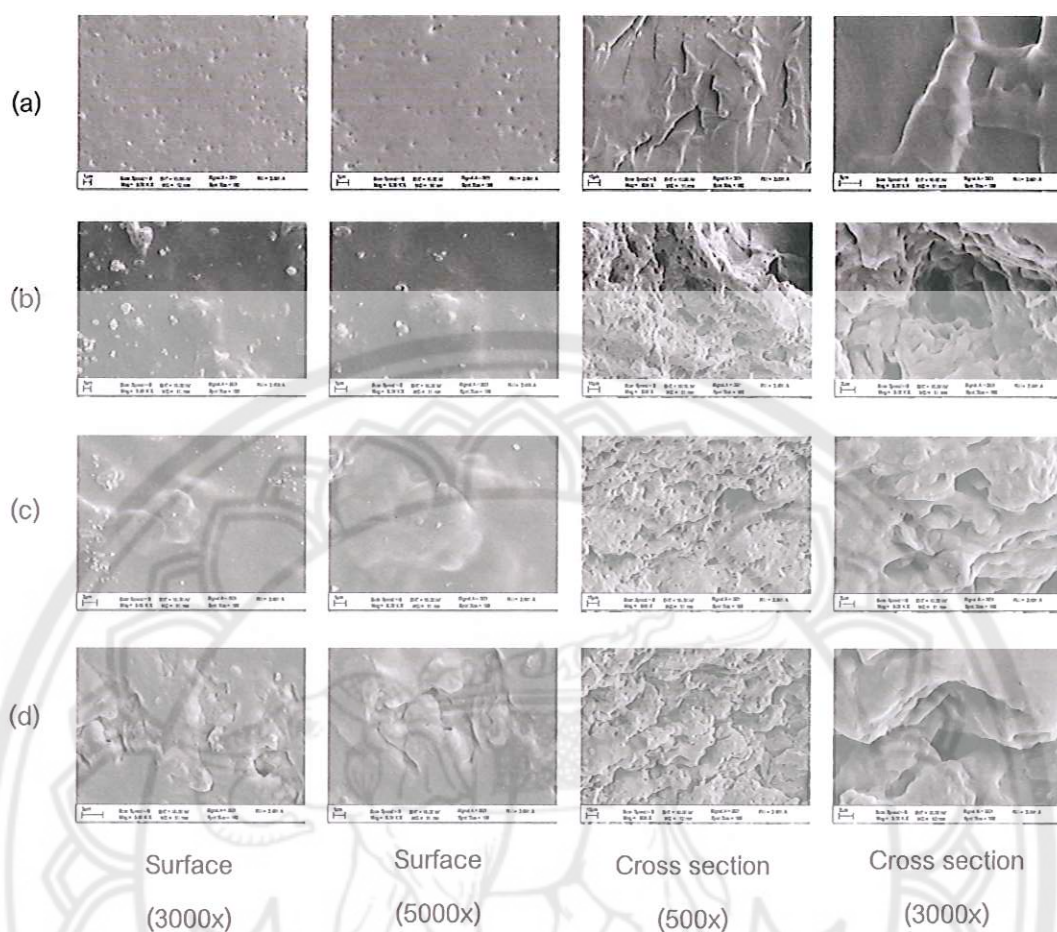
ความแตกต่างของสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH จากปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้น นอกจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังพบว่าอาจสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะที่แตกต่างกันทางมอร์โฟโลยีของไฮโดรเจลได้ด้วย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 11 ที่แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีปริมาณแบ่งเม็ดทุเรียนที่แตกต่างกัน (1-5%) เปรียบเทียบกับไฮโดรเจล PVOH ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของไฮโดรเจลโดยเฉพาะปริมาณ DSS มีผลอย่างมากต่อลักษณะมอร์โฟโลยีของมัน ทั้งขนาดและรูปร่างของรูพรุน ไฮโดรเจล PVOH (รูปที่ 11a) จะให้พื้นผิวเรียบ และไม่พบรูพรุนเมื่อตรวจวัดที่ภาคตัดขวาง ในขณะที่ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH จะมีพื้นผิวไม่เรียบ และจะเพิ่มความขรุขระมากขึ้นเมื่อมีปริมาณ DSS เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 11b-d) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลส่งผลให้โครงสร้างของไฮโดรเจลมีการเข้ากันได้ (miscible) ของ DSS กับ PVOH ลดลง ทำให้พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบเนื่องมาจากการเกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ดังจะเห็นได้ชัดเจนในภาคตัดขวางของไฮโดรเจล ซึ่งรูพรุนจะมีจำนวนมากและขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ DSS ในองค์ประกอบของไฮโดรเจล

ลักษณะมอร์โฟโลยีของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ดังกล่าว สามารถอธิบายถึงความแตกต่างของสมบัติการพองตัวในน้ำได้ การที่ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH มีค่า SR ต่ำกว่าของไฮโดรเจล PVOH เนื่องมาจากรูพรุนดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 12 นอกจากนั้นปริมาณ DSS ที่เติมลงไป ดูเหมือนจะส่งผลกระทบต่อสมบัติการพองตัวเมื่อไฮโดรเจลผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบด้วยลมร้อนมากกว่าไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่สภาพบรรยากาศ สามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของมอร์โฟโลยีของไฮโดรเจลเช่นกัน โดยที่ไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบด้วยลมร้อนจะมีลักษณะบีบอัด (compact) ทำให้มีความยืดหยุ่นน้อยจึงเกิดการขยายหรือพองตัวออกได้น้อยกว่าในสารละลายน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่บรรยากาศ ดังแสดงให้เห็นจากการเปรียบเทียบของภาคตัดขวางของไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งทั้งสองแบบในรูปที่ 13

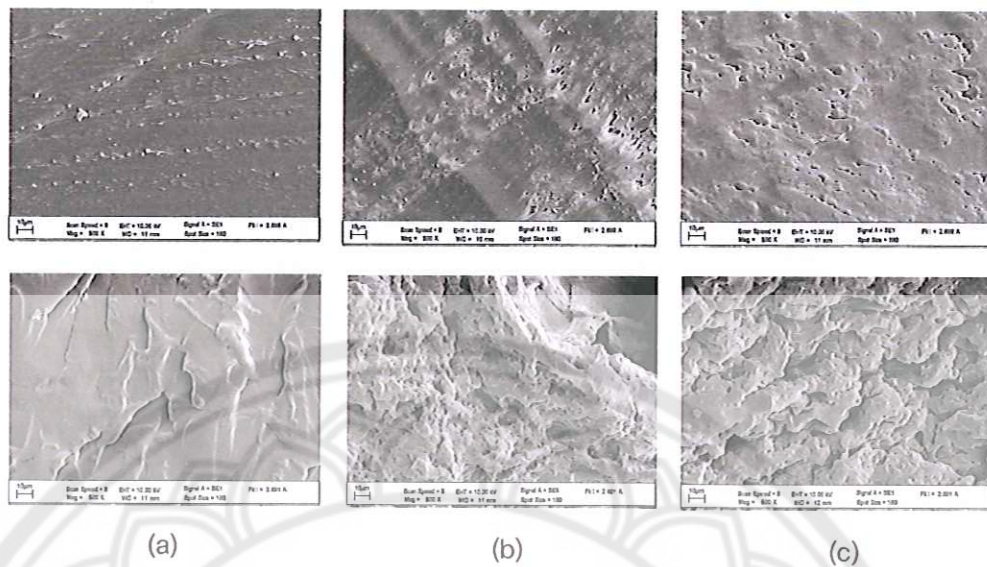
นอกจากปริมาณ DSS ที่มีผลต่อสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลแล้ว ปริมาณกลูตาราลดีไฮด์และ PVOH ต่างก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะมอร์โฟโลยีที่แตกต่างกันในการทำงานกับในกรณีของปริมาณ DSS ดังแสดงในรูปที่ 14-17 กล่าวโดยสรุปได้ว่า มอร์โฟโลยีของไฮโดรเจลมีผลอย่างมากต่อสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจล โดยโครงสร้างของไฮโดรเจลที่มีรูพรุนสูงจะมีค่า SR, SR_{90} และ WEC ต่ำกว่าไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างที่เรียบและมีรูพรุนน้อยกว่า ดังนั้นการให้ปริมาณ DSS, PVOH และกลูตาราลดีไฮด์ที่เหมาะสมและวิธีการทำให้แห้งจะเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลคอมโพสิต PVOH/DSS



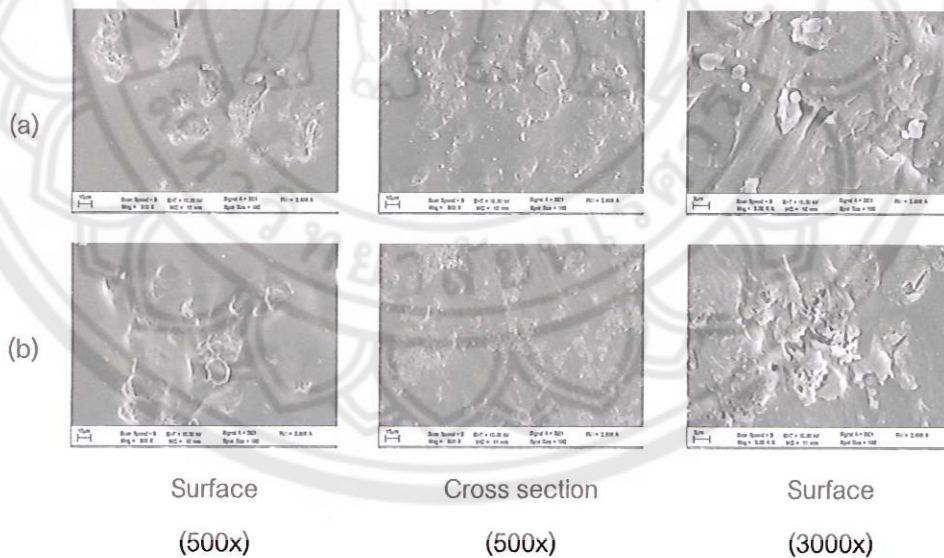
รูปที่ 11 SEM image แสดงพื้นผิว (surface) และภาคตัดขวาง (cross section) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 0%, (b) 1%, (c), 3%, (d) 5% ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน



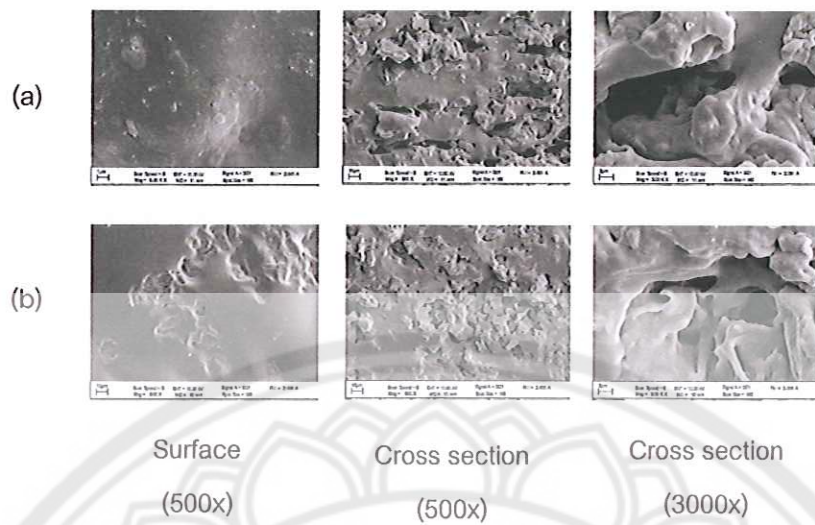
รูปที่ 12 SEM image แสดงพื้นผิว (surface) และภาคตัดขวาง (cross section) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 0%, (b) 1%, (c), 3%, (d) 5% ที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ



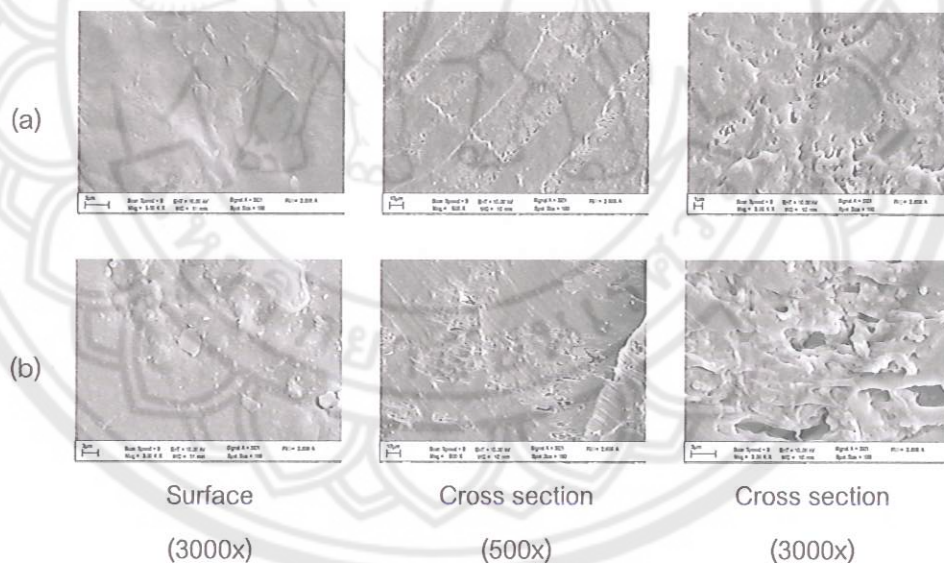
รูปที่ 13 เปรียบเทียบ SEM image ภาคตัดขวาง (cross section) ที่กำลังขยาย 500x ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 0% (b) 1% และ (c), 5% ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยกระบวนการแตกต่างกัน 2 แบบ คือ (บน) การอบลมร้อน และ (ล่าง) ที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ



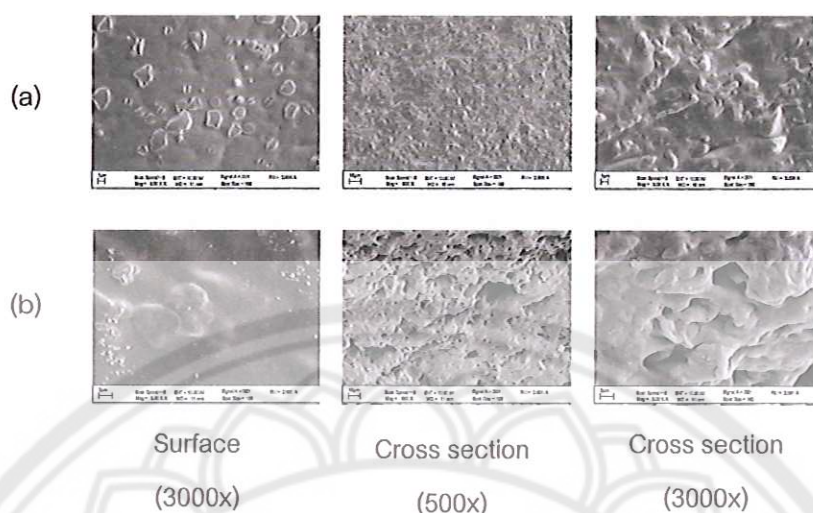
รูปที่ 14 SEM image แสดงภาคตัดขวาง (cross section) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 3% DSS ที่ใช้สารเชื่อมขวาง (กลูตาราลดีไฮด์) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (a) 1% และ (b) 1.5% ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน



รูปที่ 15 SEM image แสดงภาคตัดขวาง (cross section) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 3% DSS ที่ใช้สารเชื่อมขวาง (กลูตาราลดีไฮด์) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (a) 1% และ (b) 1.5% ที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ



รูปที่ 16 SEM image แสดงพื้นผิว (surface) และภาคตัดขวาง (cross section) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ PVOH ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 10% และ (b) 15% ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อน



รูปที่ 17 SEM image แสดงพื้นผิว (surface) และภาคตัดขวาง (cross section) ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ PVOH ที่ปริมาณแตกต่างกัน (a) 10% และ (b) 15% ที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ

ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของไฮโดรเจลคอมโพสิต PVOH/DSS

น้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมถึงแม้จะอยู่ในระดับความเข้มข้นต่ำ (มก./ลิตร) ก็เป็นปัญหาที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัจจุบันมีความเข้มงวดของมาตรฐานนานาชาติ (international standards) ทางสิ่งแวดล้อมกำกับ ทำให้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องบำบัดน้ำทิ้งเหล่านี้ก่อนปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การบำบัดโดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ (biological methods) เช่น เทคนิคการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบดั้งเดิม (conventional biological wastewater treatment processes) ไม่ประสบผลสำเร็จมากนัก เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมได้ต่ำ (Ciardelli and Ranieri, 2001) ในขณะที่การบำบัดโดยอาศัยกระบวนการทางเคมี (chemical treatment processes) เช่น การใช้โอโซน (ozonation) และคลอรีน (chlorination) มีประสิทธิภาพดีกว่า (Issac, 1996; Tang and Huren, 1995) แต่ก็มีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนเทคนิคอื่นเช่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน การสกัดด้วยตัวทำละลาย ล้วนแต่มีข้อจำกัดในระดับหนึ่งทั้งสิ้น

เทคโนโลยีการดูดซับ (adsorption technology) บนซัพพอร์ต (support) นับว่าเป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับการยอมรับสำหรับกำจัดสีย้อมสังเคราะห์จากน้ำทิ้ง เนื่องจากมีการลงทุนต่ำ (negligible one-time investment) การแยกทำได้ง่าย (separation-easy) และสะดวกต่อการใช้งาน (use-conveniently) (Asher and Bhatti, 2012) โดยทั่วไปมักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นตัวดูดซับ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของการแยกออกหลังใช้งานและการนำกลับมาใช้ใหม่ (Jiuhui, 2008) ดังนั้นถึงแม้ถ่านกัมมันต์จะเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ก็มี

ราคาแพงเกินกว่าจะนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อม โดยเฉพาะในขนาดสเกลใหญ่ (Chatterjee et al., 2011)

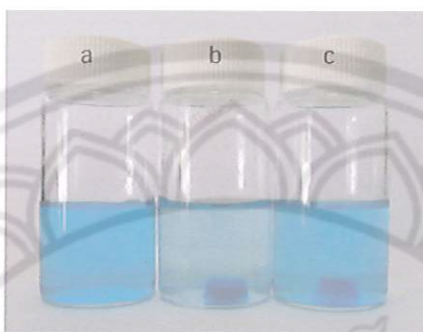
งานวิจัยนี้เป็นการใช้ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มาจากการผสมกันของแป้งเม็ดทุเรียนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของการเตรียมไฮโดรเจล ซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีโดยอาศัยการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ในสภาวะความเข้มข้นต่ำ โดยคาดหวังว่าจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้สูง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อแช่ไฮโดรเจลในสารละลายน้ำ สายโซ่ไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ (hydrophobic polymer chains) ของไฮโดรเจล จะไม่ถูกทำให้ละลายในน้ำ เนื่องจากแต่ละโมเลกุลของพอลิเมอร์ยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันจากการเกิดเชื่อมขวาง และเนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันจำพวกไอออนิก (ionic functional group) จึงทำให้มันสามารถดูดซับและดักจับสีย้อมอนินทรีย์ (ionic dyes) ไว้ได้ อย่างไรก็ตาม โมเลกุลสีย้อมที่อยู่ในน้ำทั้งเมื่อสัมผัสกับไฮโดรเจลอาจจะแทรกซึม (penetrate) เข้าสู่ภายในไฮโดรเจลหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับการกระทำทางกายภาพ-เคมีที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับเครือข่ายพอลิเมอร์ และสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน (partition coefficient) ของโมเลกุลของสีย้อมที่เกิดขึ้นระหว่างเครือข่ายพอลิเมอร์ ไฮโดรเจล กับเฟสตัวทำละลาย

มลภาวะที่เกิดจากการปนเปื้อนสีย้อมแคทไอออนิก (cationic dyes) กำลังเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญประการหนึ่ง สีย้อมแคทไอออนิกมีการใช้งานมากในหลากหลายอุตสาหกรรมเพื่อย้อมสีผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ และเครื่องสำอาง ประมาณการกันว่ามีสีย้อมถึง 15% ที่สูญเสียในระหว่างกระบวนการย้อมสีที่ถูกปนเปื้อนในน้ำทิ้ง (Zollinger, 1987) โดยทั่วไปสีย้อมแคทไอออนิกจะมีความเป็นพิษมากกว่าสีย้อมแอนไอออนิก (anionic dyes) เนื่องจากสีย้อมประเภทนี้จะเกิดการกระทำกับประจุลบบนเซลล์เมมเบรนได้ง่าย จึงสามารถเข้าสู่ภายในเซลล์และเกิดการทำให้เข้มข้นขึ้น (concentrate) ที่ไซโตพลาสซึม (cytoplasm) (Hao and Kim, 2000)

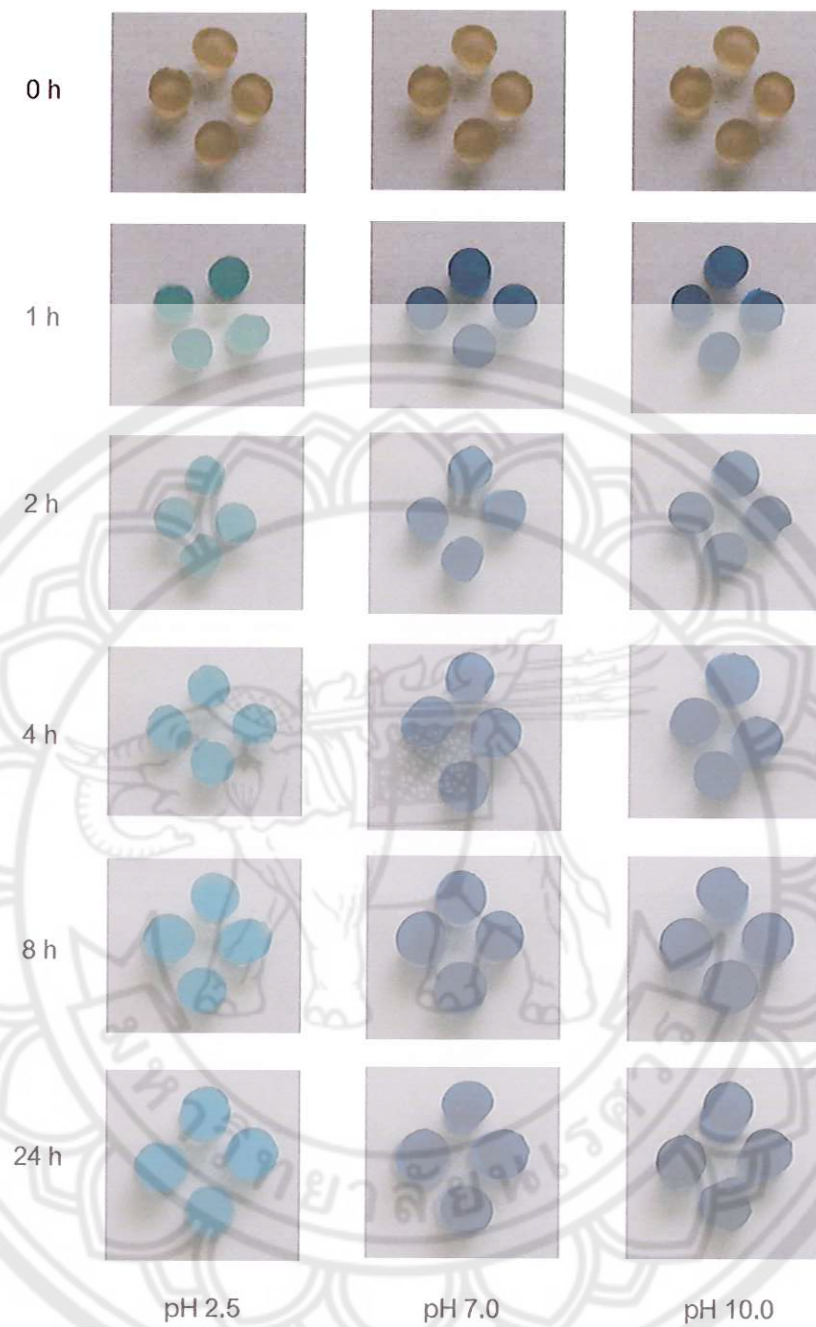
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สีย้อมเมทิลีนบลู (methylene blue) เป็นแบบจำลองของสีย้อมแคทไอออนิกสำหรับศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ทั้งนี้เนื่องจากเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมในกลุ่มไทอาซีน (thiazine dye) ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุลอะโรมาติก (aromatic molecule) และมีการใช้งานในอุตสาหกรรมหลากหลาย (Rafatullah et al., 2010) โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์กระดาษสี ยา ย้อมผมแบบชั่วคราว ผ้าฝ้ายและไม้ย้อมสี เป็นต้น ถึงแม้ว่าเมทิลีนบลูจะไม่นับเป็นสารที่เป็นอันตรายอย่างเฉียบพลัน (strongly hazardous) แต่ก็มีผลอันตรายต่อมนุษย์ เช่น ทำให้การเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้น ตัวเขียว (cyanosis) ดีซ่าน (jaundice) และเนื้อร้าย (tissue necrosis) (Paulino et al., 2006)

สารละลายเมทิลีนบลูในน้ำมีสีฟ้าน้ำเงิน หลังจากแช่ไฮโดรเจลลงในสารละลายตามระยะเวลาที่กำหนด ไฮโดรเจลจะดูดซับสีย้อมและเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) ในขณะที่สารละลายมีสีฟ้าอ่อนลง รูปที่ 18 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเมทิลีนบลูหลังจากไฮโดรเจลสัมผัสกับเมทิลีนบลูที่ระยะเวลาหนึ่ง ตามที่กำหนด และรูปที่ 19-22 แสดงลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้ง (ที่อุณหภูมิห้อง) พองตัว

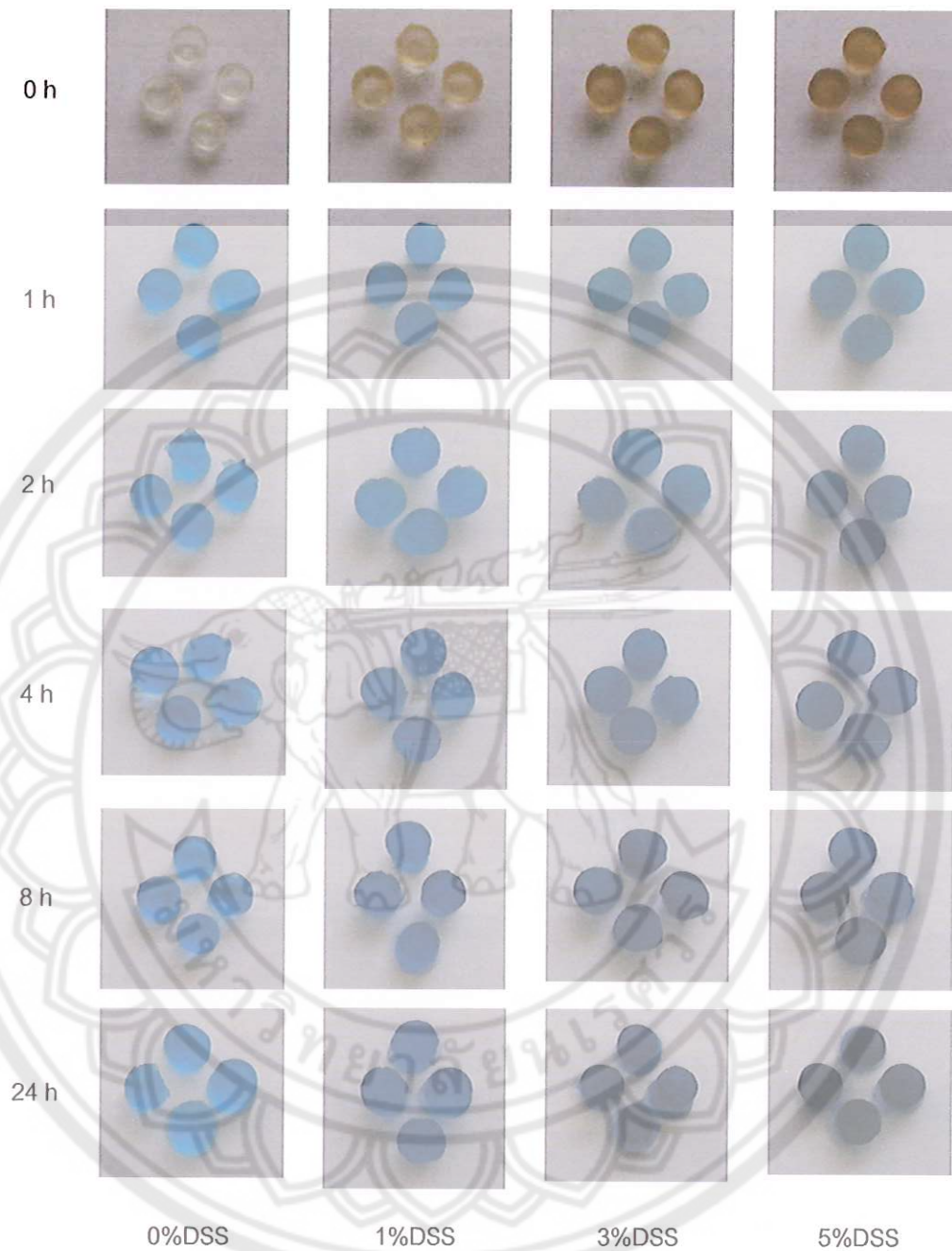
ก่อนและหลังสัมผัสกับเมทิลีนบลูที่ระยะเวลาหนึ่งตามที่กำหนด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่แตกต่างกันอันเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของ pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู (รูปที่ 19) และองค์ประกอบของไฮโดรเจล ได้แก่ ปริมาณ DSS (รูปที่ 20) ปริมาณ PVOH (รูปที่ 21) และความเข้มข้นของกลาราลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง (รูปที่ 22)



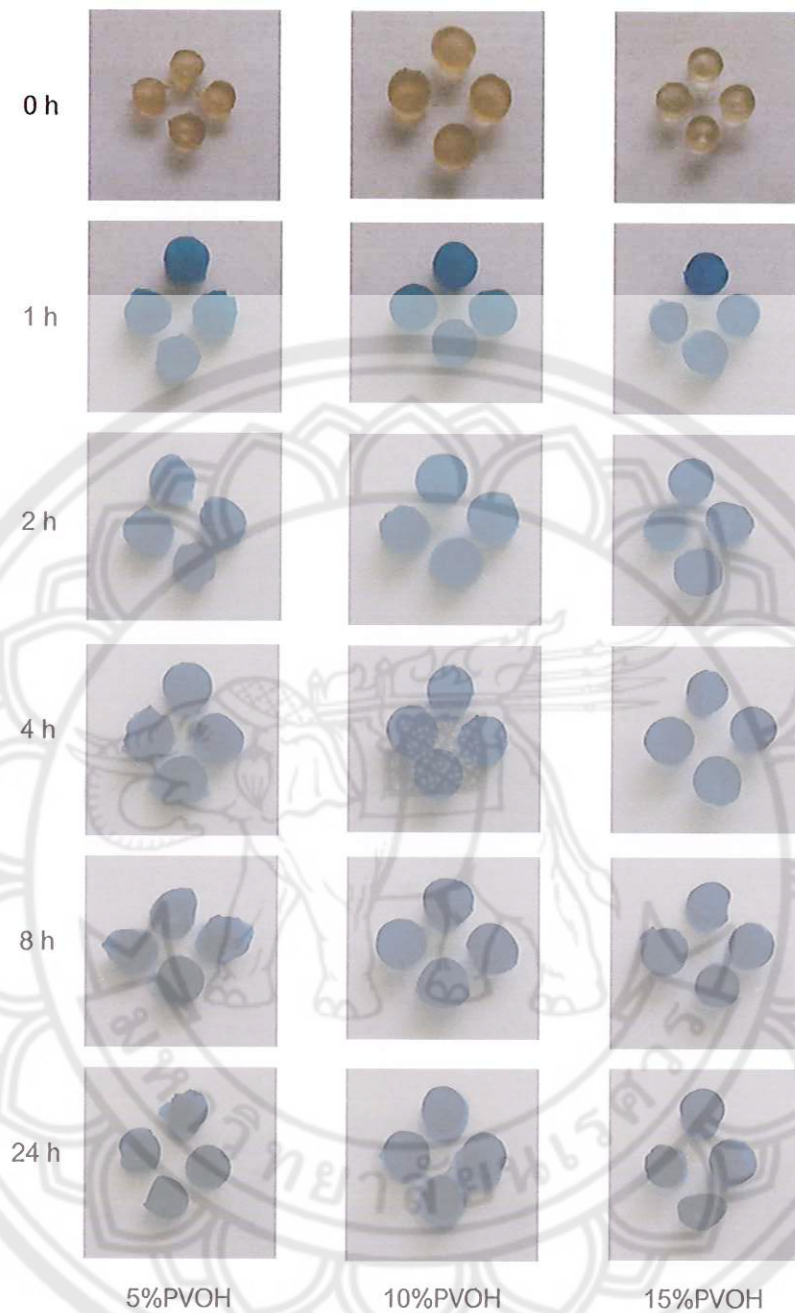
รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย MB เมื่อเวลาที่ให้ไฮโดรเจลดูดซับ (adsorption time) (a) 0 นาที (b) 3%DSS, 60 นาที และ (c) 0%DSS, 60 นาที ในสถานะที่สารละลาย MB มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2×10^{-5} M (pH 7.0) และน้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลที่แน่นอนประมาณ 10 มก.



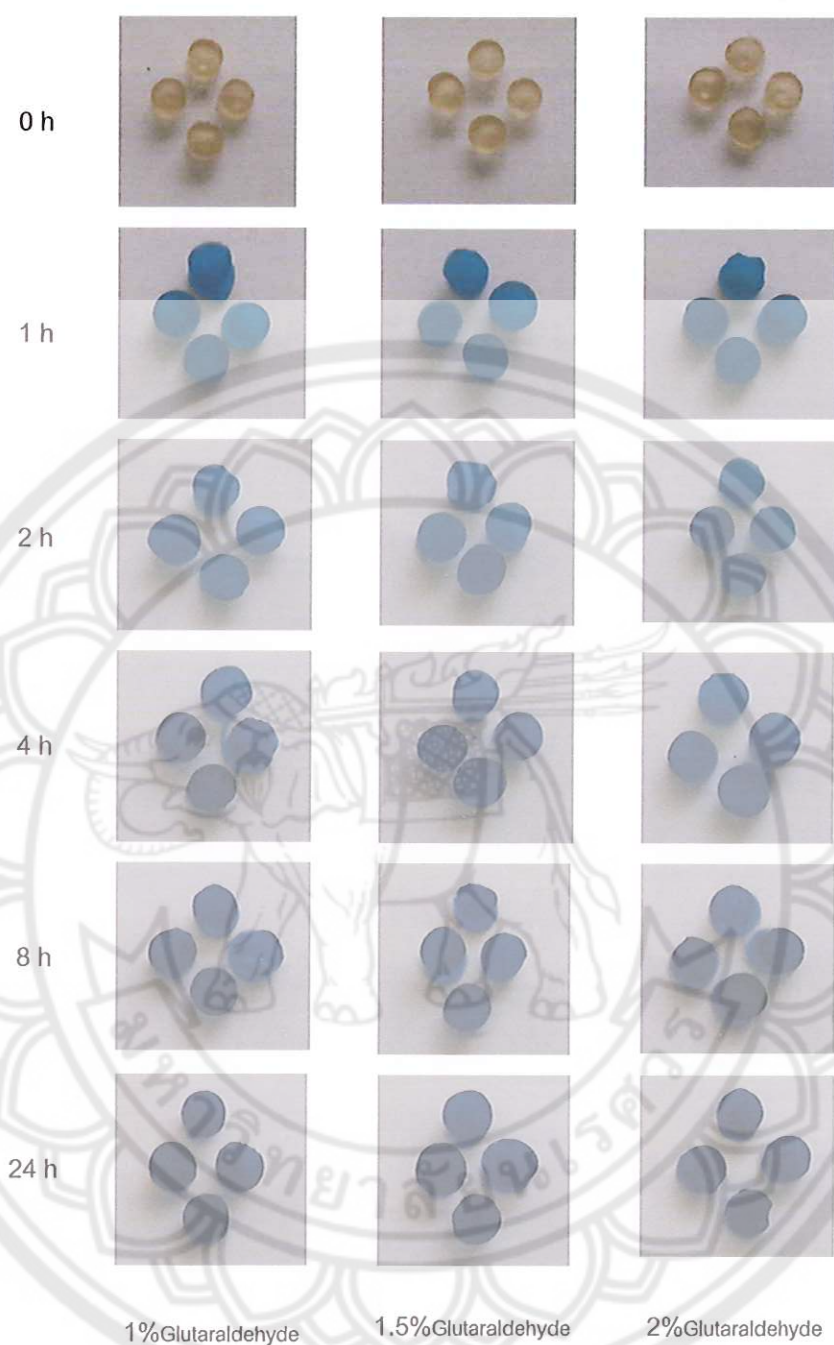
รูปที่ 19 ผลของ pH ของสารละลาย MB ต่อการดูดซับสีของมอนไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS + 10%PVOH และผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลอยู่สัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0, 1, 2, 4, 8 และ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 20 ผลของปริมาณ DSS (0, 1, 3 และ 5%) ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 10%PVOH ต่อการดูดซับสีย้อม MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลอยู่สัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0, 1, 2, 4, 8 และ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 21 ผลของปริมาณ PVOH (5, 10 และ 15%) ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 3%DSS ต่อการดูดซับสีย้อม MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0, 1, 2, 4, 8 และ 24 ชั่วโมง



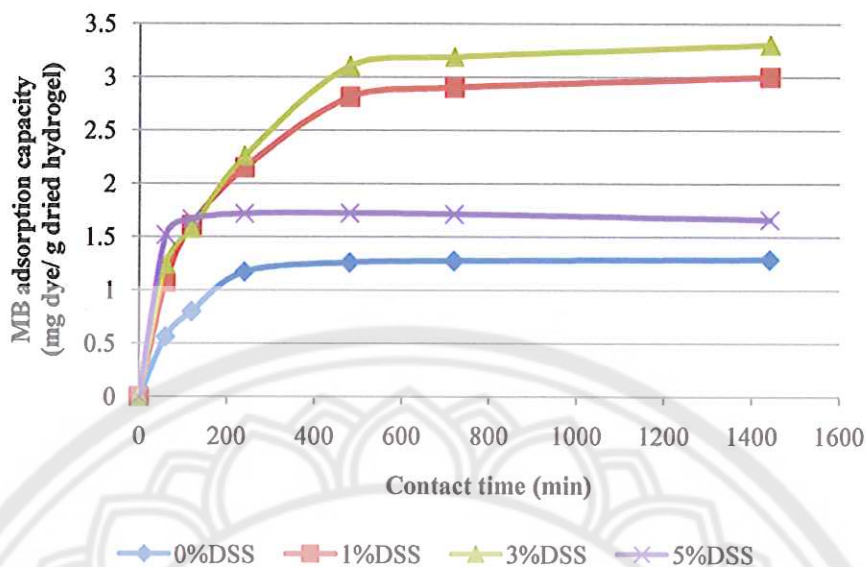
รูปที่ 22 ผลของความเข้มข้นของสารเชื่อมขวาง (cross-linker) (1, 1.5 และ 2%) ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 3%DSS = 10%PVOH ต่อการดูดซับสีย้อม MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0, 1, 2, 4, 8 และ 24 ชั่วโมง

ผลของปริมาณพอลิเมอร์ (DSS และ PVOH) ที่เป็นองค์ประกอบของไฮโดรเจล

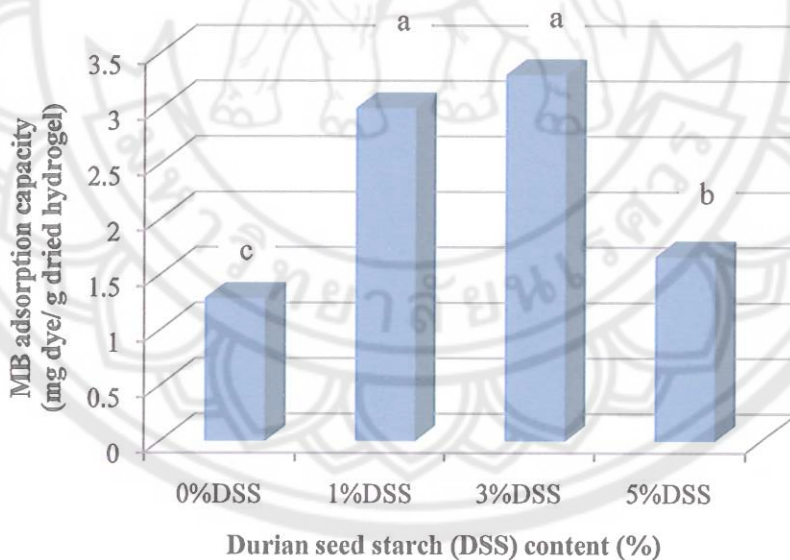
จากผลการทดลองพบว่า รูปแบบการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้น อัตราการดูดซับจะลดลง และเข้าสู่สมดุล ซึ่งอาจอธิบายกลไกการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลได้ว่า ในช่วงแรก MB จะถูกดูดซับที่พื้นผิวด้านนอกของไฮโดรเจล และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น MB จะถูกแพร่ผ่าน (diffuse) เข้าไปภายใน โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของไฮโดรเจลอย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตามการสะสมของ MB ที่พื้นผิวจะเป็นตัวกีดขวางการแพร่ผ่านของไฮโดรเจลสู่ภายใน (Zhou et al., 2013)

ปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี ย้อมเทิลลินบลู จากรูปที่ 23 จะเห็นได้ว่าการเติม DSS ลงในไฮโดรเจล pVOH จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับ MB ในสารละลายน้ำเพิ่มขึ้น กระบวนการดูดซับถูกควบคุมโดยการถ่ายโอนมวลจากภายนอก (external mass transfer) ในช่วงแรกของการดูดซับ และเป็นแบบการแพร่ผ่าน (diffusion) ในช่วงหลัง โดยมีระยะเวลา สมดุลเข้าใกล้ 24 ชั่วโมง โดยช่วงใกล้สมดุลจะมีการเปลี่ยนแปลงของ MB ที่ถูกดูดซับอย่างช้า ๆ เนื่องมาจากการแพร่ผ่านของโมเลกุล MB เข้าไปที่ตำแหน่ง adsorbing site ในรูพรุน (micropore) นั้นเอง ดังนั้นถ้าไฮโดรเจลมี ปริมาตรของรูพรุนสูง ก็จะมีพื้นที่ผิวที่มีตำแหน่งยึดเหนี่ยว (binding site) ของ MB มากขึ้นด้วย (Asgher and Bhatti, 2002) อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ DSS เป็น 5% นอกจากไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ MB แล้ว ยังมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงด้วย (รูปที่ 24) โดยแตกต่างต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับ ไฮโดรเจลที่มีปริมาณ DSS 1% และ 3% ทั้งนี้อาจอธิบายได้ด้วยสมบัติการพองตัวของมันที่มีค่า SR ต่ำกว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณ DSS ต่ำกว่าที่ประกอบด้วย 1% และ 3%DSS อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลที่มีปริมาณ DSS 5% ก็ยังมีประสิทธิภาพการดูดซับ MB ดีกว่าไฮโดรเจล PVOH ที่ไม่มีการเติม DSS อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ดังนั้นจึง อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มแบ่งเม็ดทุเรียนในองค์ประกอบของไฮโดรเจล PVOH ในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจะ ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัด MB ในสารละลายน้ำของไฮโดรเจลให้ดีขึ้น

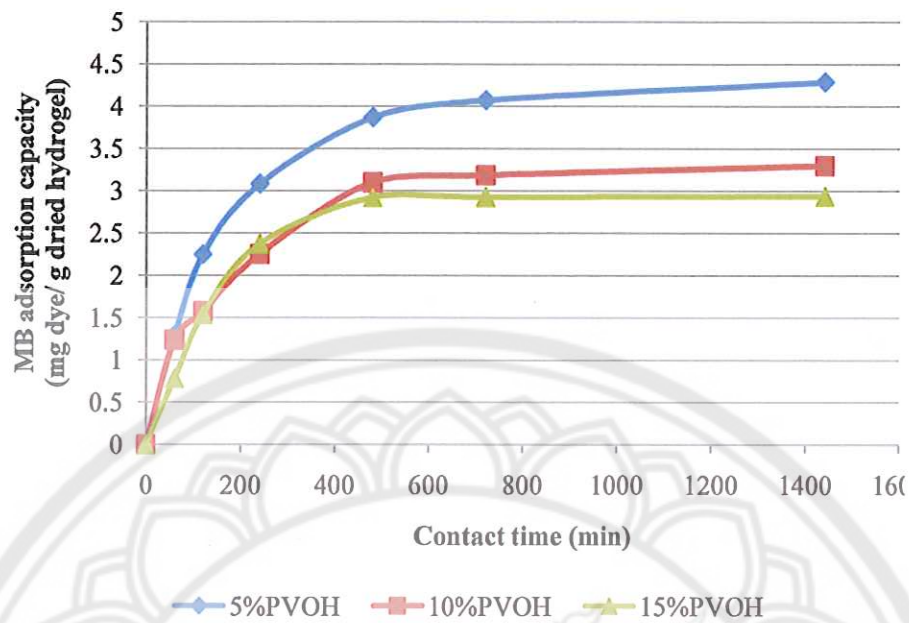
ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 25-26 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณ PVOH จาก 5% เป็น 10% และ 15% มี ผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของไฮโดรเจล DSS/PVOH เช่นกัน ถึงแม้ว่าจะมีอิทธิพลน้อยกว่าปัจจัยของ ปริมาณ DSS โดยไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVOH สูง (10% และ 15%) มีประสิทธิภาพการดูดซับ MB ต่ำกว่าไฮโดร เจลที่มีปริมาณ PVOH ต่ำกว่า (5%) อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากไฮโดรเจลที่มีการเติม PVOH มากจะ ส่งผลให้ไฮโดรเจลมีการพองตัวน้อยลง โดยผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของ ไฮโดรเจล DSS/PVOH เกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์กับทั้งพื้นที่ผิวภายนอก ปริมาตรของรูพรุนในโครงสร้างภายใน และ ความสามารถในการพองตัวในสารละลายน้ำของไฮโดรเจลด้วย



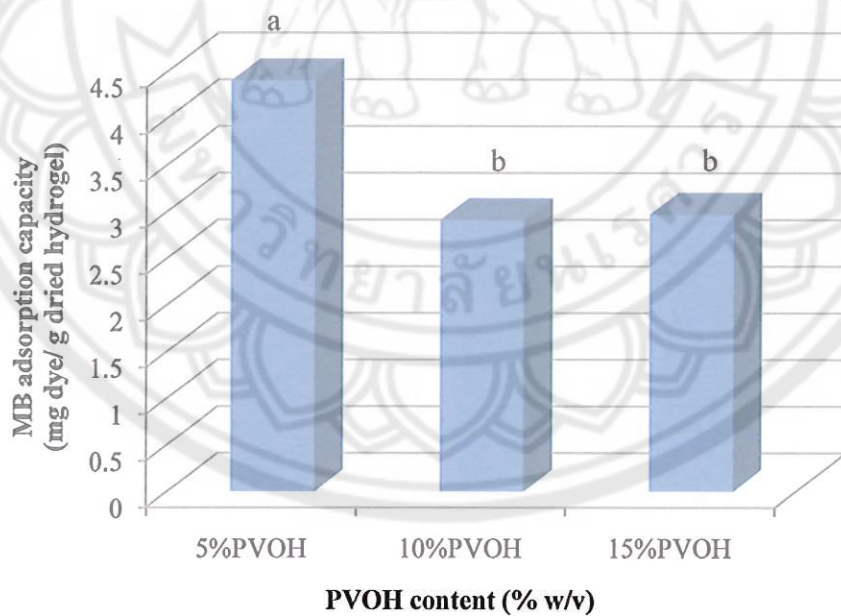
รูปที่ 23 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ ปริมาณ DSS ที่แตกต่างกัน (0-5%) และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0



รูปที่ 24 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ ปริมาณ DSS ที่แตกต่างกัน (0-5%) และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 25 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ ปริมาณ PVOH ที่แตกต่างกัน (5-15%) และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0



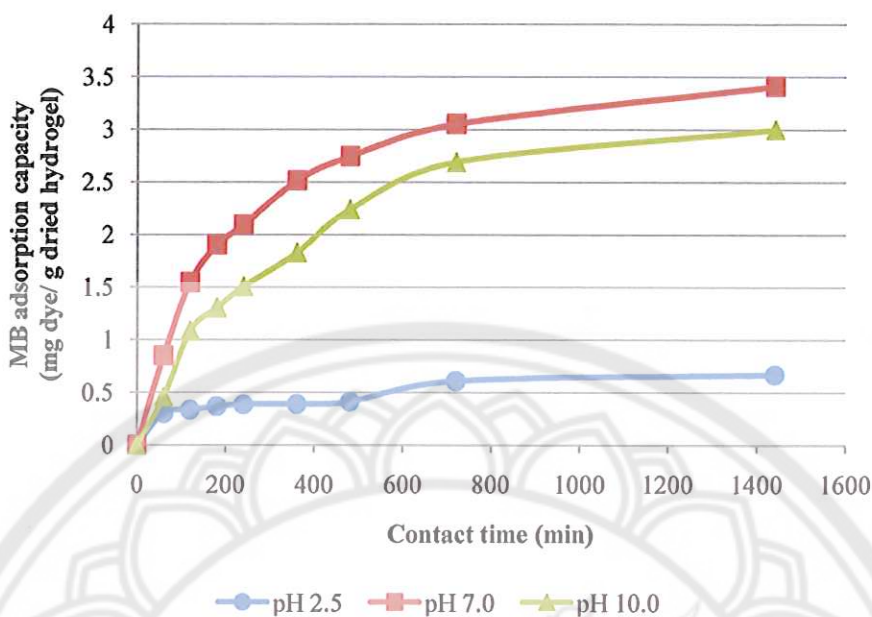
รูปที่ 26 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ ปริมาณ PVOH ที่แตกต่างกัน (5-15%) และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย MB

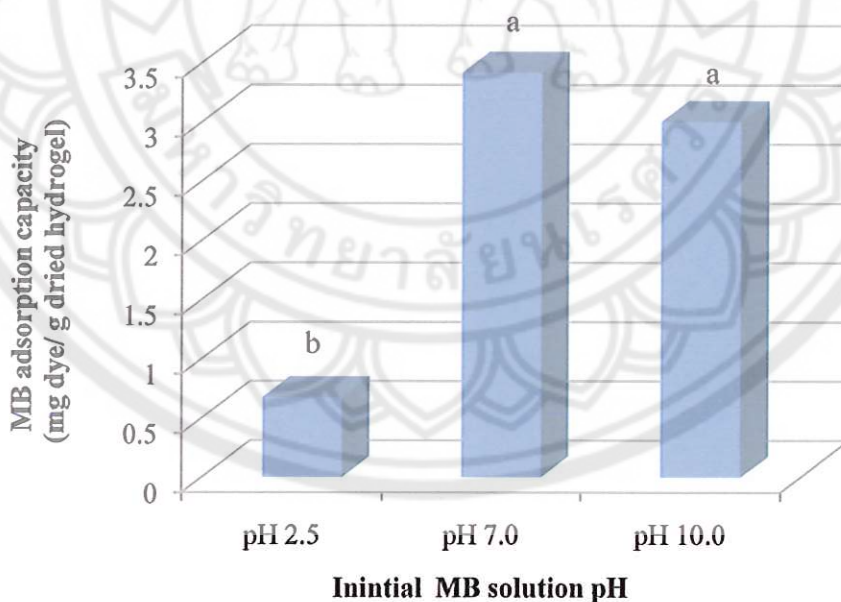
นอกจากปริมาณของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของไฮโดรเจลจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB แล้ว จากผลการทดลองยังพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ยังขึ้นกับ pH เริ่มต้นของสารละลาย MB อย่างมาก ซึ่งอาจอธิบายได้ด้วยกลไกการถ่ายโอนการดูดซับ (adsorption transport mechanism) ของเครือข่ายพอลิเมอร์ที่พองน้ำ (swollen polymer networks) โดยประสิทธิภาพการดูดซับของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ในสภาวะที่มีความเข้มข้น MB ต่ำ ($2 \times 10^{-5} \text{ M}$) ที่มีค่า pH เริ่มต้นของสารละลาย MB เท่ากับ 2.5, 7.0 และ 10.0 มีค่าเท่ากับ 0.671, 3.411 และ 2.998 mg/g ตามลำดับ (รูปที่ 27) เมื่อเข้าสู่ 24 ชั่วโมงที่ไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลาย MB

กลไกการดูดซับที่ขึ้นกับ pH ของสารละลายเมทิลีนบลูอาจอธิบายได้ง่าย ๆ ว่า สีย้อมไอออนิก (ionic dyes) เมื่อนำมาละลายน้ำ จะมีการแตกตัวให้สีย้อมแคทไอออน/แอนไอออนในสารละลาย ประสิทธิภาพการดูดซับของสีย้อมที่มีประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับขึ้นกับ pH ของสารละลาย สำหรับ MB เป็นสีย้อมในกลุ่ม basic dyes ดังนั้นเมื่ออยู่ในสารละลายน้ำจะแตกตัวให้สีย้อมที่อยู่ในรูป cation (C^+) และ reduced ion (CH^+) ดังนั้นถ้าไฮโดรเจลอยู่ในสภาวะที่เป็นเบส จะทำให้ที่พื้นผิวของไฮโดรเจลมีความหนาแน่นของประจุลบเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถดูดซับสีย้อมแคทไอออนิก (MB) ได้ดีขึ้น (Mohanty et al., 2006) นอกจากนี้เมื่อ MB อยู่ในสารละลายกรด สีย้อมแคทไอออนิกจะถูกโปรโตเนต (protonated) ทำให้มีความหนาแน่นของประจุบวกบนโมเลกุลของสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ต่ำลง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับ MB ลดลง

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเบสเป็น pH 10.0 ประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของ ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH กลับไม่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของประจุลบที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้เกิดแรงผลักรังไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic repulsion force) ของหมู่ที่อยู่ข้างเคียงกันบนเครือข่ายพอลิเมอร์ ทำให้มีการขัดขวางการเข้ามาของสีย้อมสู่ภายในเครือข่ายพอลิเมอร์ของไฮโดรเจล (Paulino et al., 2006) ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสีย้อมสูงสุด จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุม pH ของสารละลายสีย้อมให้เหมาะสมกับชนิดของสีย้อมและตัวดูดซับ



รูปที่ 27 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย MB ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10% PVOH และสารละลาย MB ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0

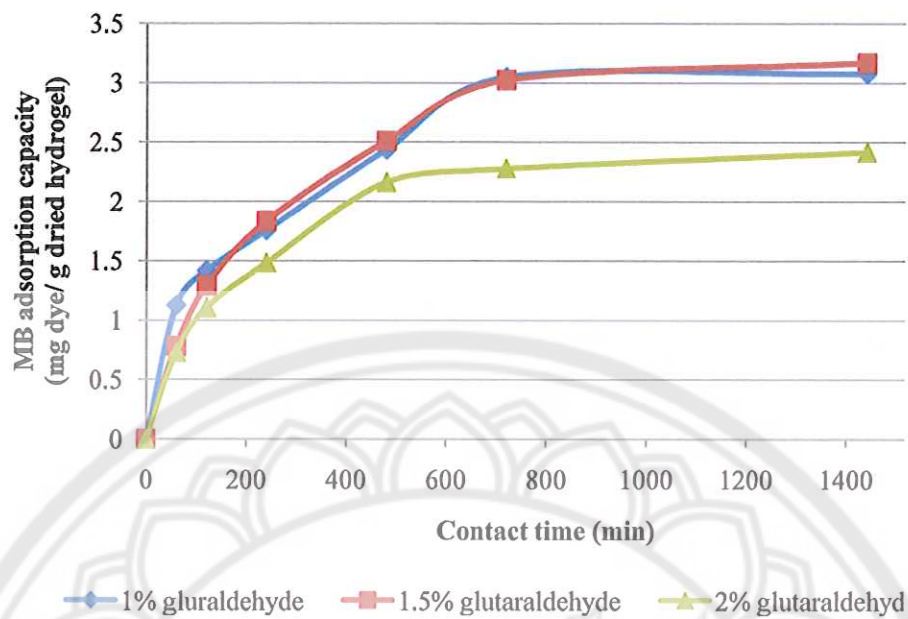


รูปที่ 28 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย MB ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10% PVOH และสารละลาย MB ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

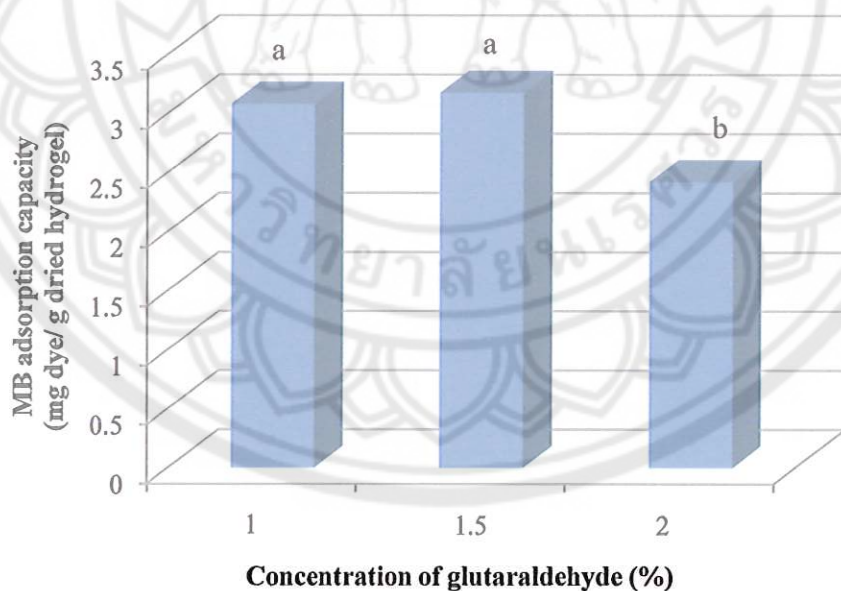
ผลของความเข้มข้นของสารเชื่อมขวาง

รูปที่ 29-30 แสดงให้เห็นถึงผลของความเข้มข้นของกอลลูตาราลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB ไฮโดรเจลจะดูดซับ MB ได้ดีเมื่อใช้ความเข้มข้นของกอลลูตาราลดีไฮด์ที่ 1-1.5% โดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับ MB เท่ากับ 3.076 ± 0.235 และ 3.170 ± 0.068 มก./ก. แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 2% กลับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ MB ลดลงเหลือเพียง 2.417 ± 0.081 มก./ก. เท่านั้น ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าเครือข่ายของพอลิเมอร์ที่เหมาะสม (optimal polymer network) ระหว่าง PVOH กับ DSS เกิดขึ้นในสภาวะที่ใช้กอลลูตาราลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวทำให้ MB สามารถแพร่ผ่านเข้าสู่ภายในไฮโดรเจลได้ง่ายและทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีความเสถียร แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกอลลูตาราลดีไฮด์ มีผลทำให้ไฮโดรเจลมีเครือข่ายพอลิเมอร์หนาแน่นขึ้น โมเลกุลของ MB จึงถ่ายโอน (transfer) เข้าสู่ภายในเครือข่ายภายในไฮโดรเจลได้ยากขึ้น (Ma et al., 2012)





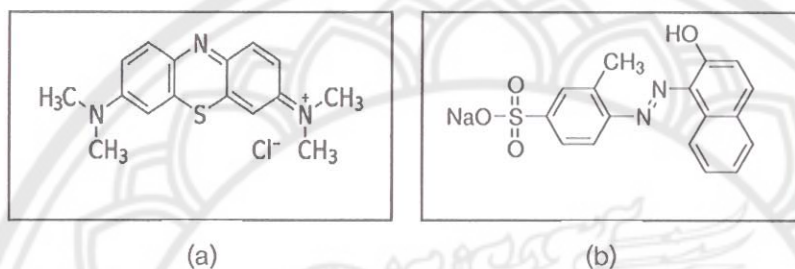
รูปที่ 29 ผลของความเข้มข้นของกลูตาราลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางในกระบวนการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0



รูปที่ 30 ผลของความเข้มข้นของกลูตาราลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางในกระบวนการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ MB เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และอยู่ในสารละลาย MB ที่มี pH 7.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

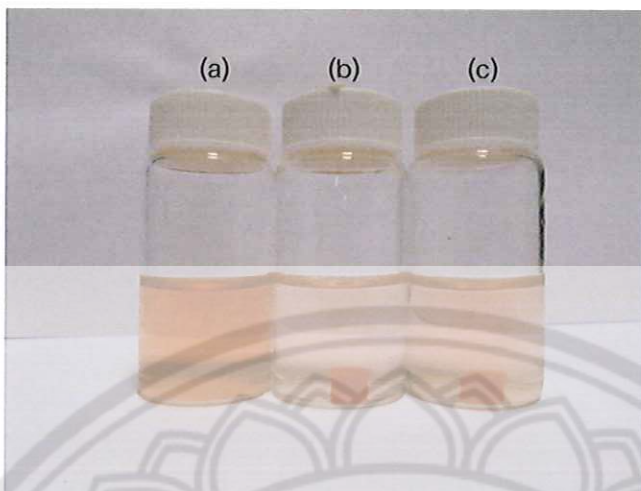
ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมแอซิดออเรนจ์ 8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

ในขณะที่ MB เป็นสีย้อมแคทไอออนิกที่มีโครงสร้างเป็นสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกอะโรมาติก (heterocyclic aromatic compound) เป็นสีย้อมประเภทไทอาซีน (thiazine dyes) สีย้อมแอซิดออเรนจ์ 8 (acid orange 8; AO₈) จัดเป็นสีย้อมแอนไอออนิกประเภทเอโซ (azo dyes) ดังแสดงโครงสร้างเปรียบเทียบในรูปที่ 31 สีย้อมประเภทเอโซมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งผลกระทบระบบนิเวศน์สูง อีกทั้งการย่อยสลายสีย้อมในกลุ่มเอโซ (synthetic azo-dyes) ก่อให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตสูง เนื่องจากจะให้สารพิษในกลุ่มสารประกอบอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine compounds) ที่เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen)

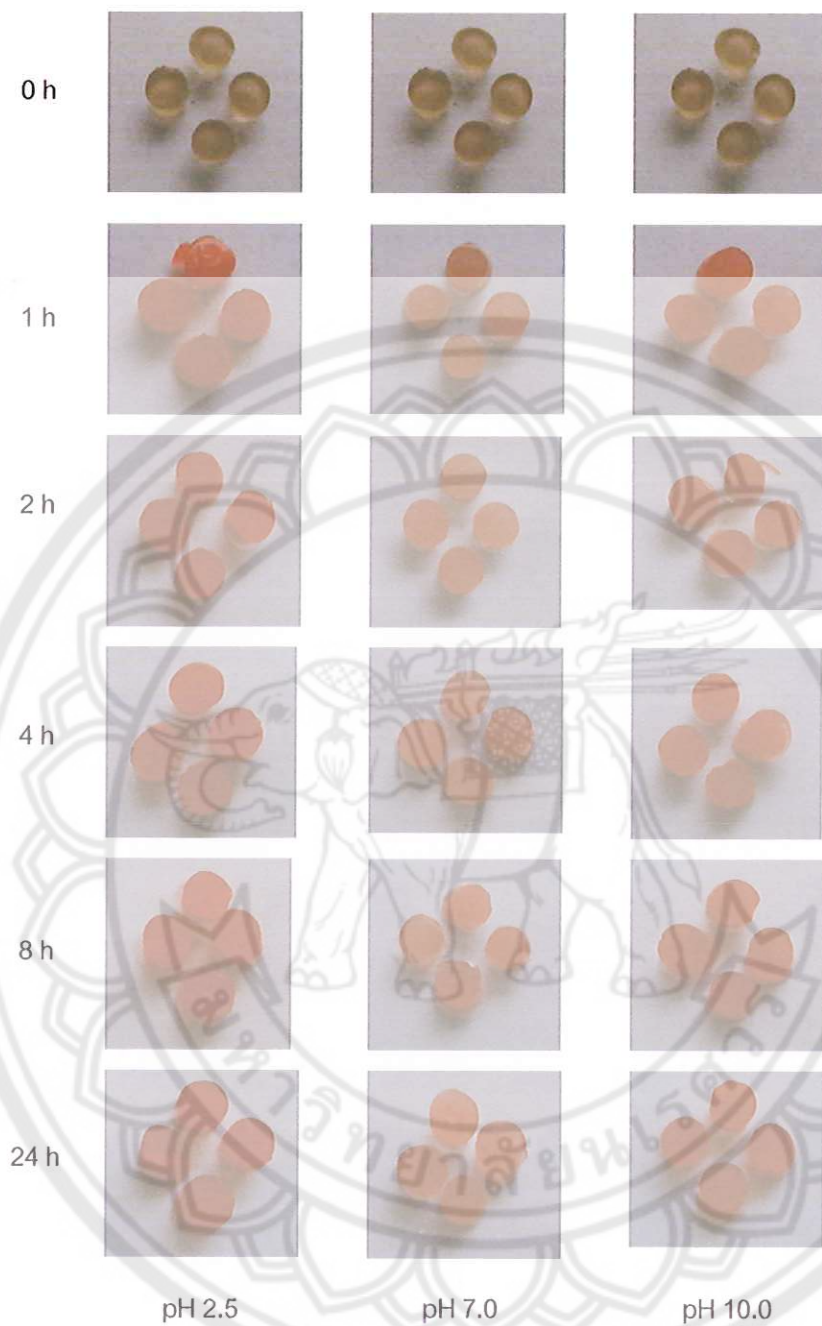


รูปที่ 31 โครงสร้างทางเคมีของ (a) MB และ (b) AO₈

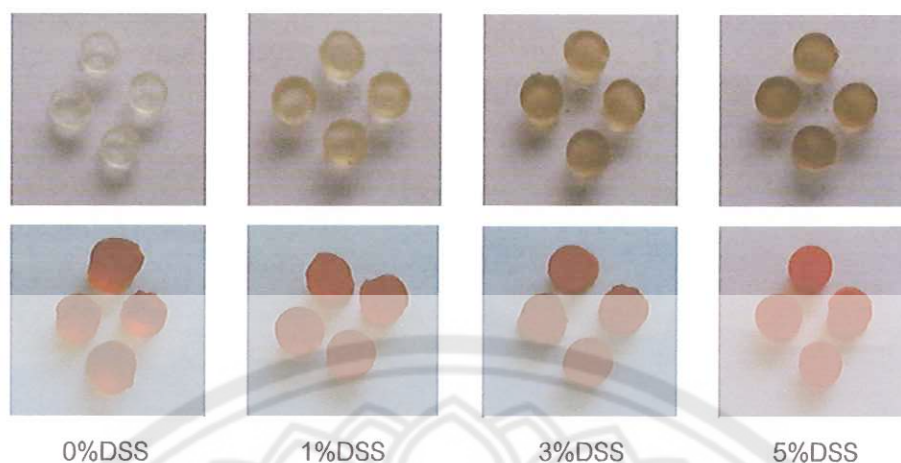
สารละลาย AO₈ ในน้ำมีสีส้ม หลังจากแช่ไฮโดรเจลลงในสารละลายตามระยะเวลาที่กำหนด ไฮโดรเจลจะดูดซับสีย้อมและเปลี่ยนเป็นสีส้ม ในขณะที่สารละลายมีสีส้มอ่อนลง รูปที่ 32 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อม หลังจากให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO₈ ที่ระยะเวลาหนึ่งตามที่กำหนด และรูปที่ 33-36 แสดงลักษณะที่ปรากฏของไฮโดรเจลที่อยู่ในสถานะแห้ง (ที่อุณหภูมิห้อง) พองตัวก่อนและหลังสัมผัสกับ AO₈ ที่ระยะเวลาหนึ่งตามที่กำหนด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการดูดซับ AO₈ ที่แตกต่างกันอันเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของ pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู (รูปที่ 33) และองค์ประกอบของไฮโดรเจล ได้แก่ ปริมาณ DSS (รูปที่ 34) ปริมาณ PVOH (รูปที่ 35) และความเข้มข้นของกลูตาแรลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง (รูปที่ 36)



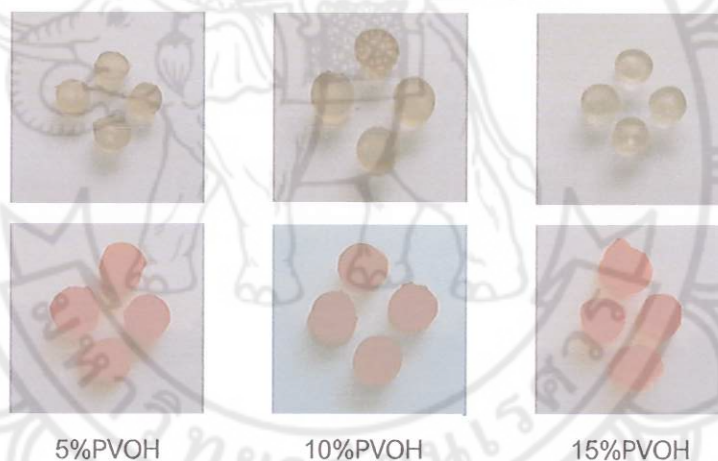
รูปที่ 32 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย AO_8 ในสภาวะที่สารละลาย AO_8 มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2×10^{-5} M ที่ (a) เวลาเริ่มต้น ($t=0$) และเมื่อเวลาที่ให้ไฮโดรเจลดูดซับเป็นเวลา 60 นาที ในสารละลาย AO_8 ที่มี (b) pH 2.5 และ (c) 7.0 โดยให้น้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลที่แน่นอนประมาณ 10 มก.



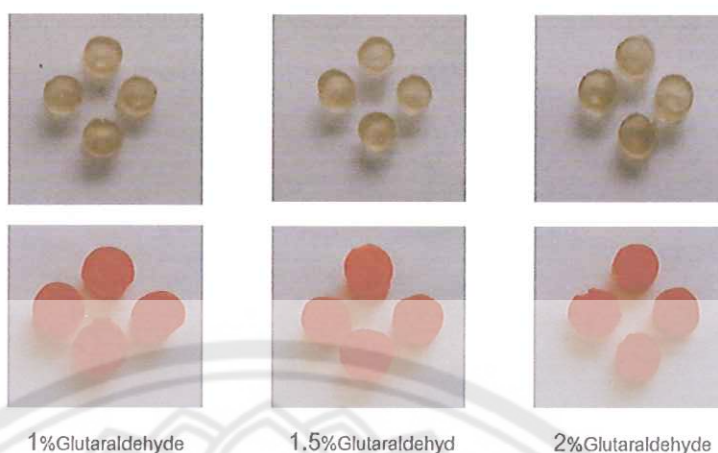
รูปที่ 33 ผลของ pH ของสารละลาย AO8 ต่อการดูดซับสีของไมโครเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS + 10%PVOH และผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลอยู่สัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0, 1, 2, 4, 8 และ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 34 ผลของปริมาณ DSS (0, 1, 3 และ 5%) ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 10%PVOH ต่อการดูดซับสีย้อม AO8 บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง

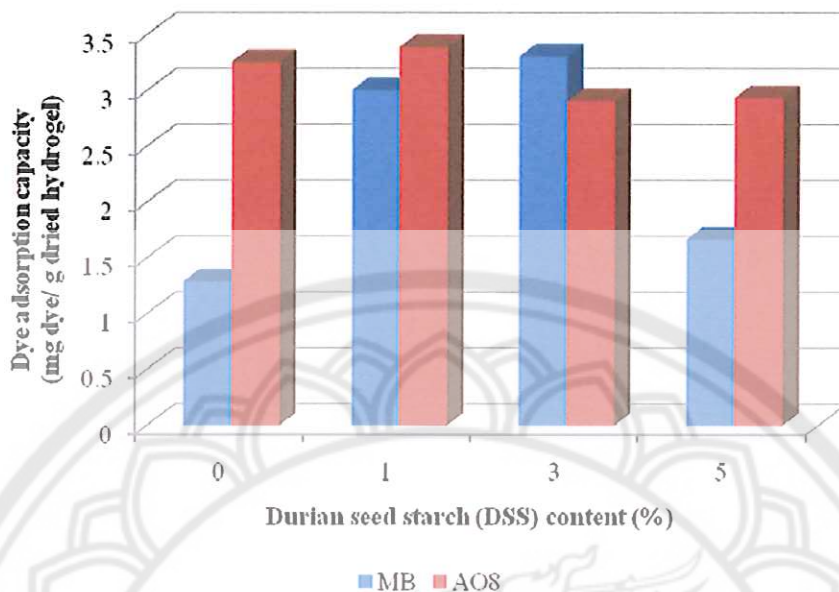


รูปที่ 35 ผลของปริมาณ PVOH (5, 10 และ 15%) ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มี 3%DSS ต่อการดูดซับสีย้อม MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง

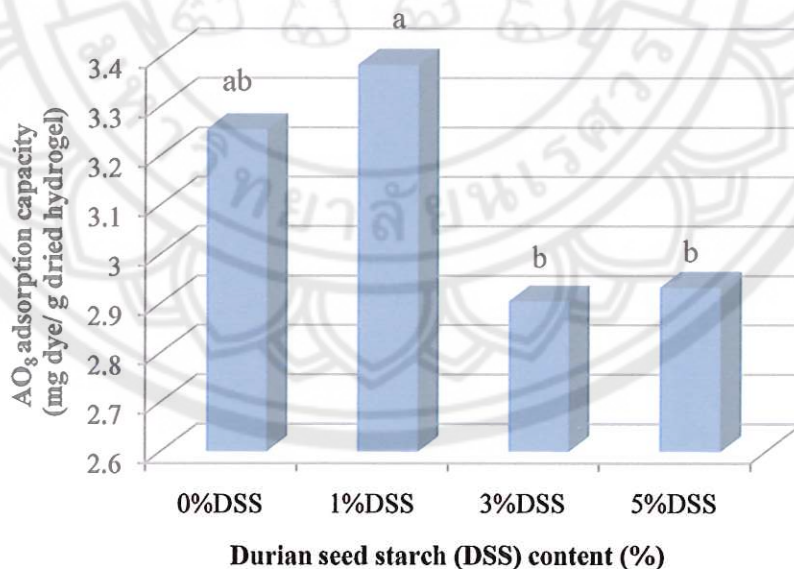


รูปที่ 36 ผลของความเข้มข้นของสารเชื่อมขวาง (cross-linker) (1, 1.5 และ 2%) ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 3%DSS = 10%PVOH ต่อการดูดซับสีย้อม MB บนไฮโดรเจลที่ผ่านการทำให้แห้งในสภาพบรรยากาศ โดยแสดงลักษณะที่ปรากฏเมื่อไฮโดรเจลสัมผัสกับสารละลายสีย้อม (contact time) เป็นเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง

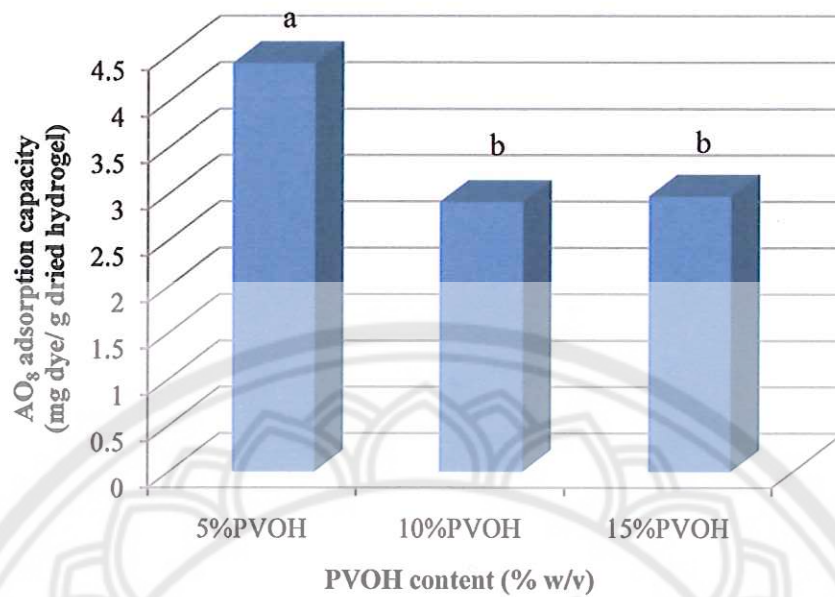
เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เช่นเดียวกับกรณีของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ MB ดังกล่าวข้างต้น พบว่าให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน (รูปที่ 37) ในสถานะที่อยู่ในสารละลายสีย้อมที่มี pH เริ่มต้นที่เหมาะสมกับแต่ละชนิดสีย้อม ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 38 ที่แสดงผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH จะเห็นว่า ปริมาณ DSS มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรเจลต่อการดูดซับ AO_8 น้อยกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับ MB โดยการเติมปริมาณ DSS ลงในไฮโดรเจล PVOH ในปริมาณ 1-5% ไม่มีความแตกต่างของของประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 ($P > 0.05$) เมื่อให้ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH สัมผัสกับสารละลาย AO_8 ที่มี pH 2.5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนั้นทั้งปริมาณ PVOH และกลูตาราลดีไฮด์ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษาต่างก็ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 39-40



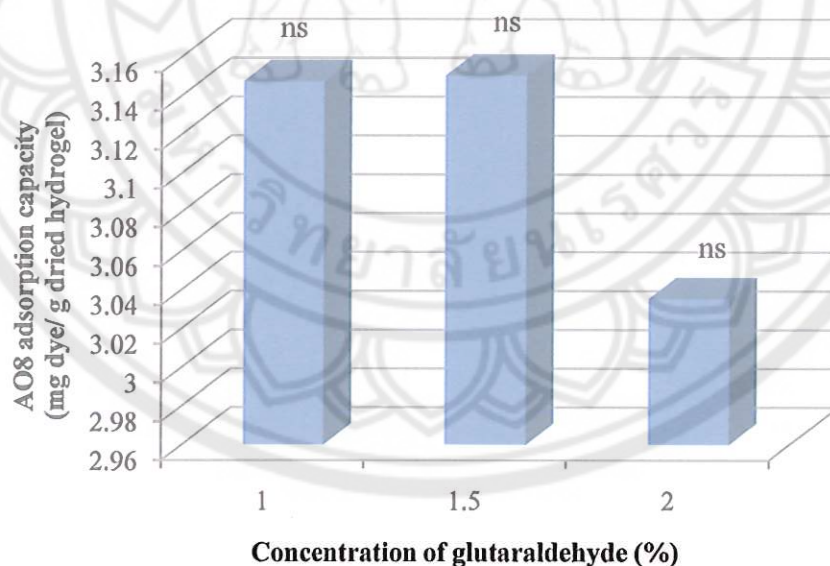
รูปที่ 37 การเปรียบเทียบผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ ปริมาณ DSS ที่แตกต่างกัน (0-5%) และอยู่ในสารละลาย MB และ AO_8 ที่มี 7.0 และ pH 2.5 ตามลำดับ เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO_8 (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 38 ผลของปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ ปริมาณ DSS ที่แตกต่างกัน (0-5%) และอยู่ในสารละลาย AO_8 ที่มี pH 2.5 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO_8 (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

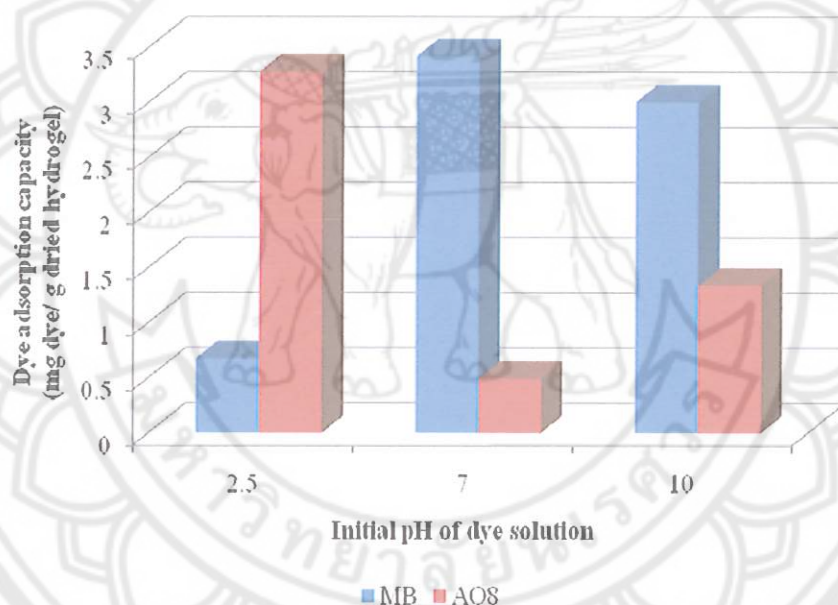


รูปที่ 39 ผลของปริมาณ PVOH ที่เป็นองค์ประกอบในไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO₈ เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ ปริมาณ PVOH ที่แตกต่างกัน (5-15%) และอยู่ในสารละลาย AO₈ ที่มี pH 2.5 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO₈ (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

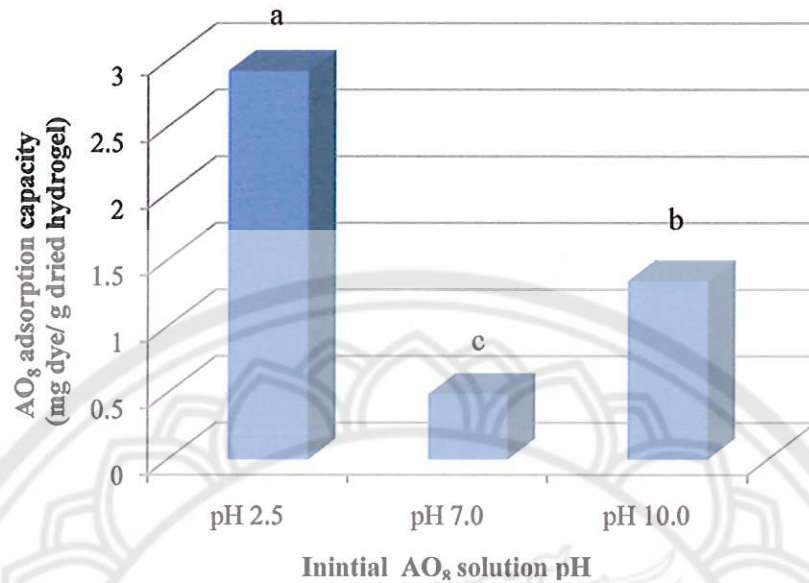


รูปที่ 40 ผลของความเข้มข้นของกลูตาราลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางในกระบวนการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO₈ เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3%DSS และ 10%PVOH และอยู่ในสารละลาย AO₈ ที่มี pH 2.5 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ MB (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

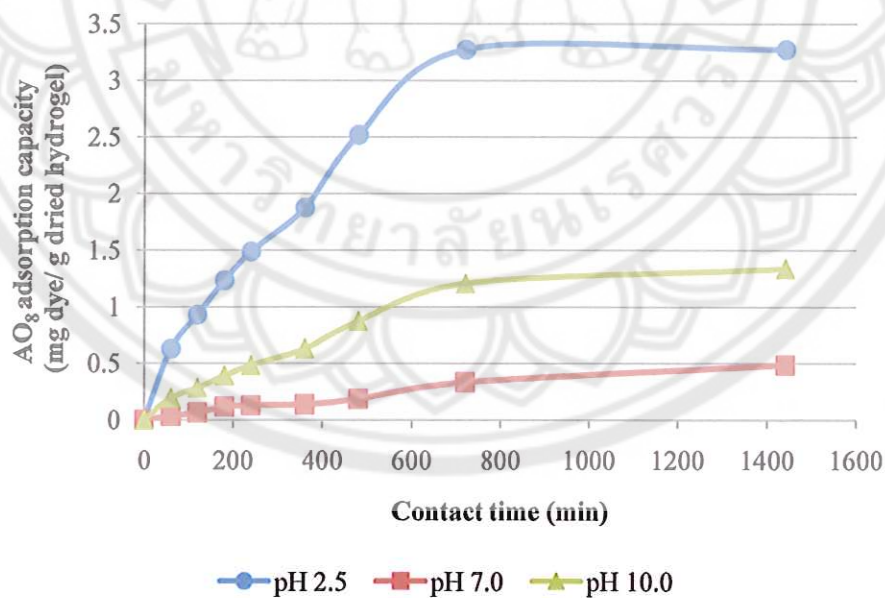
ในขณะที่ปัจจัยในเรื่องของ pH เริ่มต้นของสารละลายมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เช่นเดียวกับในกรณีของประสิทธิภาพการดูดซับ MB แต่เนื่องจากสีย้อม AO_8 เป็นสีย้อมแอนไอออนิก ในขณะที่สีย้อม MB เป็นสีย้อมแคทไอออนิก ดังนั้น pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลจึงแตกต่างกัน (รูปที่ 41) นั่นคือในขณะที่ในกรณีที่ไฮโดรเจลจะดูดซับ MB ได้ดีในสารละลายที่มี pH เป็นกลาง-เบส (ในที่นี้ pH 7.0 และ 10.0) แต่จะสามารถดูดซับ AO_8 ได้ดีในสารละลายที่มี pH เป็นกรด (ในที่นี้ pH 2.5) โดยไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10% PVOH และสารละลาย AO_8 ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO_8 (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 ได้เท่ากับ 2.915 ± 0.162 , 0.488 ± 0.098 และ 1.337 ± 0.060 mg AO_8 /g dried hydrogel (รูปที่ 42) โดยจะไฮโดรเจลจะดูดซับสีย้อม AO_8 ได้ค่อนข้างช้า เพราะจะเข้าสู่สมดุลเมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับสีย้อมเป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 43



รูปที่ 41 การเปรียบเทียบผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อประสิทธิภาพการดูดซับของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10% PVOH และสารละลาย MB และ AO_8 ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO_8 (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 42 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย AO₈ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO₈ ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10% PVOH และสารละลาย AO₈ ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0 เมื่อให้ไฮโดรเจลสัมผัสกับ AO₈ (contact time) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 43 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย AO₈ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ AO₈ ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH เมื่อใช้ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบเป็น 3% DSS และ 10% PVOH และสารละลาย AO₈ ที่มี pH เริ่มต้นแตกต่างกัน 2.5, 7.0 และ 10.0

จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH

เมื่อต้องการอธิบายประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ โดยเลือกทดสอบทั้งแบบจำลองจลศาสตร์แบบ pseudo-first-order และ pseudo-second-order ในเบื้องต้นพบว่าไม่สามารถใช้แบบจำลองจลศาสตร์แบบ pseudo-first-order อธิบายการดูดซับในการทดลองนี้ได้อย่างสิ้นเชิง

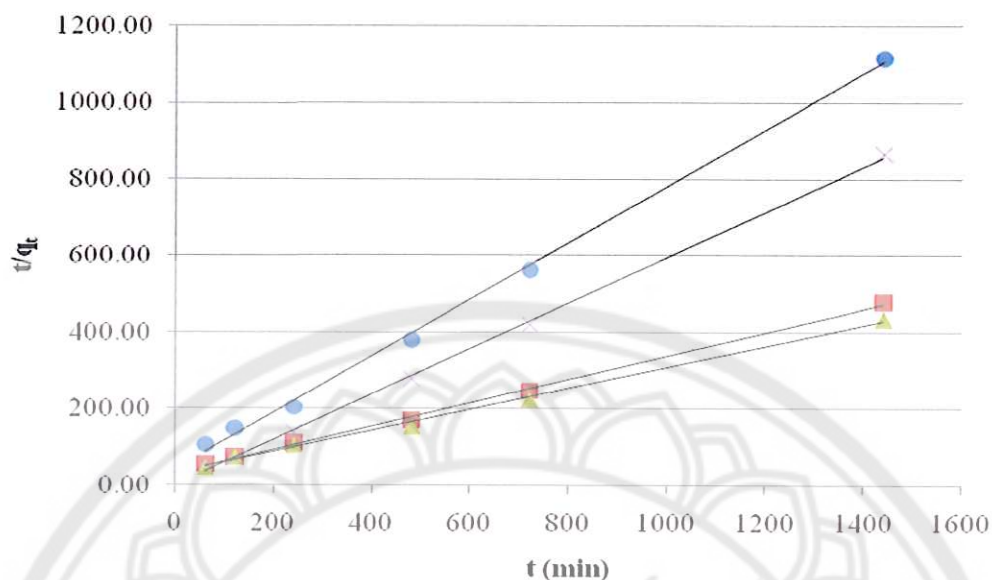
สำหรับแบบจำลองจลศาสตร์แบบ pseudo-second-order เมื่อถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH โดยเป็นไปตามสมการ (5) ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

เมื่อ q_e (mg/g) เป็นประสิทธิภาพของการดูดซับ (adsorption capacity) ของไฮโดรเจลที่สภาวะสมดุล และ K_2 (min^{-1}) เป็นค่าคงที่อัตรา (rate constant) เมื่อนำสมการนี้มาอินทิเกรตที่สภาวะขอบเขต $q_t = 0$ at $t=0$ and $q_t = q_t$ at $t=t$ จะได้สมการ (6) ที่อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (6)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้ความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 44 (สำหรับ MB) และรูปที่ 45 (สำหรับ AO₈) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า K_2 และ q_e ได้จากค่าความชัน (slope) และจุดตัดแกน y (intercept) โดยแสดงค่าพารามิเตอร์ของจลศาสตร์ (kinetic parameters) ในตารางที่ 5 และ 6 สำหรับ MB และ AO₈ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้แบบจำลองจลศาสตร์แบบ pseudo-second-order จะได้กราฟเส้นตรงที่ให้ค่า calculated correlation coefficient (R^2) เข้าใกล้ 1 และให้ค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามค่า q_e ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากทฤษฎีในทั้งสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่ไม่อิ่มตัวของไฮโดรเจลเมื่อเวลา 24 ชั่วโมง ($q_{e(\text{exp})}$)

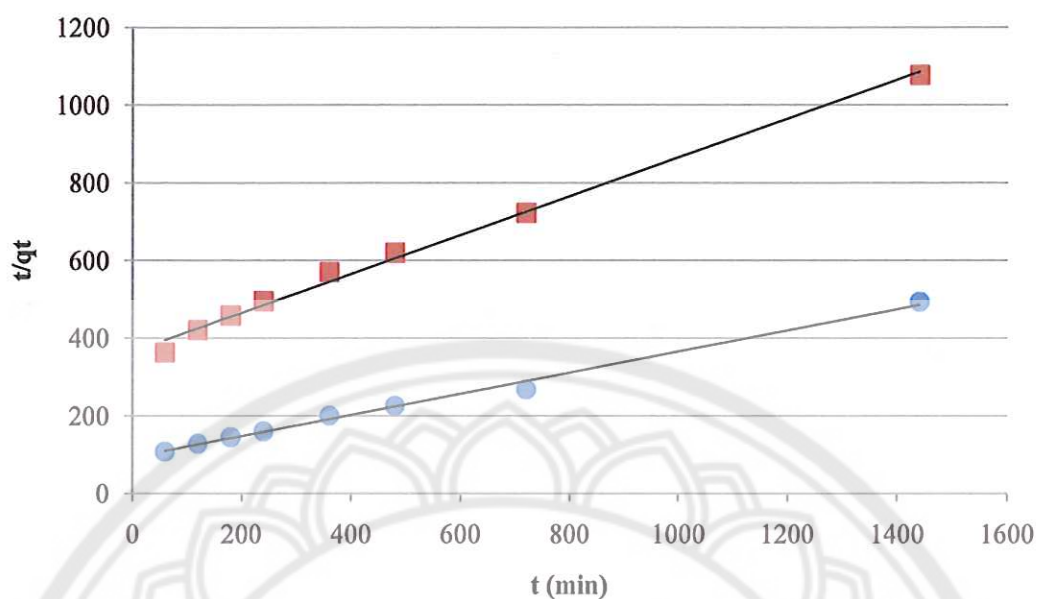


รูปที่ 44 กราฟของแบบจำลองการดูดซับ MB ที่มีจลนศาสตร์แบบ pseudo-second-order ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ DSS ที่ปริมาณแตกต่างกัน 0% (●), 1% (■), 3% (▲), 5% (×)

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของการดูดซับ MB ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ (0-5%) DSS

DSS content (%)	$q_{e(\text{exp})}$ (mg/g)	Pseudo-second-order constants		
		$q_{e(\text{calc})}$ mg/g	K_2 (g/mg.min)	R^2
0	1.288	1.358	1.19×10^{-2}	0.998
1	3.001	3.278	2.72×10^{-3}	0.998
3	3.302	3.636	2.21×10^{-3}	0.996
5	1.663	1.689	9.48×10^{-2}	0.998

* $q_{e(\text{exp})}$ refers to the amount of MB adsorbed at contact time 24 h.



รูปที่ 45 กราฟของแบบจำลองการดูดซับ AO_8 ที่มีจลนศาสตร์แบบ pseudo-second-order ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่มีองค์ประกอบเป็น 10%PVOH และ 3%DSS เมื่อใช้สีย้อมที่มี pH เริ่มต้นเป็น 2.5 (●), และ 10.0 (■)

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของการดูดซับ AO_8 ของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ประกอบด้วย 10% PVOH และ 3% DSS เมื่อใช้สีย้อมที่มี pH เริ่มต้นเป็น 2.5 และ 10.0

Initial AO_8 solution pH	$q_{e(exp)}$ (mg/g)	Pseudo-second-order constants		
		$q_{e(calc)}$ mg/g	K_2 (g/mg.min)	R^2
2.5	2.915	3.676	7.83×10^{-4}	0.994
10.0	1.337	2.004	6.80×10^{-4}	0.994

* $q_{e(exp)}$ refers to the amount of MB adsorbed at contact time 24 h.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ไฮโดรเจลมีโครงสร้างสามมิติที่เกิดจากการเชื่อมขวางของเครือข่ายพอลิเมอร์ของโซ่ที่ยืดหยุ่น จึงทำให้สามารถดูดซับและเหนียวรั้งน้ำและโมเลกุลของตัวถูกละลายไว้ และเนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันจำพวกไอออนิก จึงทำให้มันสามารถดูดซับและดักจับสีย้อมอนินทรีย์สังเคราะห์ไว้ได้ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสับเซตรสำหรับเตรียมคอมโพสิตไฮโดรเจลในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบ่งเม็ดทุเรียนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งต่างก็เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเม็ดทุเรียนมีองค์ประกอบหลักเป็นแป้งประมาณร้อยละ 56 โดยน้ำหนักแห้ง สามารถแยกแบ่งออกจากเม็ดทุเรียนโดยกระบวนการอย่างง่ายในระดับห้องปฏิบัติการให้ผลผลิตประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักเปียก ให้แบ่งสูงที่มีลักษณะชั้น เหนียว ยืดติด โปร่งแสง และไม่มีสี ที่สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไม่มีความเป็นพิษ และง่ายต่อการเสื่อมสลายโดยจุลินทรีย์ เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ถูกทำลายโดยปัจจัยบางประการ เช่น การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ของแบคทีเรีย โครงสร้างของไฮโดรเจลจะถูกทำให้ละลาย จึงลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นภายหลังการใช้ไฮโดรเจล ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้ดังกล่าวในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนสี ย้อมอนินทรีย์สังเคราะห์ทั้งในกลุ่มแคทไอออนิกและแอนไอออนิกในสารละลายน้ำเจือจางในระดับความเข้มข้น มิลลิกรัมต่อลิตร

จากที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า มีการใช้สีย้อมสังเคราะห์ที่เป็นอันตรายในอุตสาหกรรมหลายประเภทเพื่อย้อมสีผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทำให้เกิดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมสังเคราะห์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตถึงแม้จะในระดับความเข้มข้นต่ำก็ตาม โดยเฉพาะสีย้อมในกลุ่มเอโซที่ถูกจำแนกด้วยพันธะ $N=N$ ที่มีการใช้งานมากถึง 20-40% ของสีย้อมทุกประเภททั้งหมด (Dogan, 2007) โดยทั่วไปการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าวด้วยกระบวนการทางเคมีและชีววิทยาแบบดั้งเดิมเพื่อกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมดังกล่าวสามารถทำได้เช่นกัน แต่ไม่เพียงพอที่จะกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนออกได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากสีย้อมในกลุ่มเอโซจะเสถียรต่อแสง ความร้อน และสารออกซิไดซ์ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้วิธีการบำบัดแบบดั้งเดิมเพื่อกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งโดยเฉพาะเมื่อมีระดับความเข้มข้นต่ำมากของสีย้อมในสารละลายน้ำทิ้งในเรื่องของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการดูดซับเพื่อกำจัดสีย้อมจากสารละลายน้ำ เนื่องจากวิธีการดูดซับนับได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและมีต้นทุนในกระบวนการถูก อย่างไรก็ตามถึงแม้จะเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นตัวดูดซับที่มีการใช้งานกันมากแต่ก็มีราคาแพงและยากแก่การนำกลับมาใช้ใหม่จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาคอมโพสิตไฮโดรเจลแบ่งเม็ด

ทุเรียน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (DSS/PVOH) โดยอาศัยการดัดแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ทั้งสองด้วยสารเชื่อมขวางกูดาราลดีไฮด์ ซึ่งเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ 2 หมู่ จึงสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และเชื่อมต่อกันให้เครือข่ายพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ดีขึ้น ทั้งในเรื่องของการต้านทานการละลายน้ำ และสมบัติทางกลของไฮโดรเจล อีกทั้งยังปรับปรุงจุลศาสตร์และสมดุลของการนำเข้ของน้ำ/ตัวถูกละลายเข้าสู่เครือข่ายพอลิเมอร์ด้วย เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการประยุกต์ใช้สำหรับกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ในสารละลายน้ำ โดยอาศัยกระบวนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปและขนาดที่ง่ายต่อการใช้งานและแยกกลับคืนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และสามารถใช้ได้ดีกับการกำจัดสีย้อมทั้งที่อยู่ในรูปแคทไอออนิกและแอนไอออนิกที่ปนเปื้อนในสารละลายน้ำที่ความเข้มข้นต่ำในระดับที่น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการที่ดัดแปลงมาใช้ในงานวิจัยนี้สำหรับเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH สามารถขึ้นรูปได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องที่ไม่มีสีจนถึงสีขาวขุ่น ขึ้นกับปริมาณแบ่งเม็ดทุเรียนที่เป็นองค์ประกอบ เมื่อผ่านการทำให้แห้งจะมีความเสถียรจึงง่ายต่อการนำไปใช้งาน การทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจะให้ไฮโดรเจลที่มีสีไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ถ้าใช้ความร้อนด้วยกระบวนการอบด้วยลมร้อนถึงแม้จะที่อุณหภูมิต่ำเพียง 50 องศาเซลเซียสแต่ก็ส่งผลให้ไฮโดรเจลมีสีเข้มขึ้นในโทนเหลืองจนถึงน้ำตาล อีกทั้งยังทำให้เกิดการล่มสลายของเครือข่ายพอลิเมอร์ภายในโครงสร้าง จึงทำให้ไม่สามารถคืนรูปได้อย่างสมบูรณ์เมื่อนำกลับมาแช่ในน้ำใหม่อีกครั้ง

สมบัติที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลที่สำคัญประการหนึ่งคือสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลในสารละลาย โดยปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลต่อสมบัติการพองตัวในน้ำมีหลายประการ ได้แก่ ปริมาณพอลิเมอร์ทั้งแบ่งเม็ดทุเรียนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ปริมาณกูดาราลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง และอุณหภูมิที่ใช้ทำให้ไฮโดรเจลแห้ง การเติมแบ่งเม็ดทุเรียนลงในไฮโดรเจล PVOH ส่งผลให้ไฮโดรเจลมีสมบัติการพองตัวในน้ำเมื่อพิจารณาจากค่า SR , $SR_{eq(24h)}$ และ EWC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องที่มีปริมาณ DSS 1% มีค่า SR ที่ 24 ชั่วโมง และ EWC เท่ากับ 86.06% และ 6.18 g/g dried hydrogel และจะลดลงเป็น 79.87% และ 4.00 g/g dried hydrogel ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณ DSS เป็น 5% ในขณะที่ไฮโดรเจล PVOH มีค่ามากกว่าเท่ากับ 87.54% และ 7.03 g/g dried hydrogel ตามลำดับ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณ DSS เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสมบัติการพองตัวของไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มปริมาณ PVOH และกูดาราลดีไฮด์ต่างก็ทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติการพองตัวในน้ำลดลงเช่นเดียวกัน โดยไฮโดรเจลที่มีสมบัติการพองตัวที่ดีกว่าจะมีลักษณะโครงสร้างเมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เรียบ (smooth) และมีรูพรุน (pore) น้อยกว่าจึงสามารถอุ้มน้ำไว้ได้ดีกว่านั่นเอง

ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH สามารถดูดซับสีย้อมแคทไอออนิกเมทิลีนบลู และสีย้อมแอนไอออนิกแอซิดออเรนจ์ 8 ได้ดีแม้ที่สภาวะสารละลายมีความเข้มข้นต่ำที่ $2 \times 10^{-5} M$ (น้อยกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร) โดยขึ้นกับปัจจัยหลายประการ แต่ที่มีอิทธิพลสูงคือ ปริมาณ DSS ที่เป็นองค์ประกอบและ pH ของสารละลายสี

ย้อมเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมขึ้นกับการเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น รูปแบบการดูดซับของทั้ง MB และ AO_8 ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน คือไฮโดรเจลจะดูดซับสีย้อมได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่พื้นผิวด้านนอกของไฮโดรเจล และเมื่อเวลาผ่านไปจึงจะแพร่ผ่านเข้าไปภายในเครือข่ายพอลิเมอร์ของไฮโดรเจล ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราการดูดซับจะลดลงจนเข้าสู่สมดุลในที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมที่ได้จากปฏิบัติมักน้อยกว่าจากทฤษฎี อาจเป็นได้ว่าการสะสมสีย้อมที่พื้นผิวเป็นตัวขัดขวางการแพร่ผ่านของสีย้อมเข้าสู่ภายในไฮโดรเจล เมื่อศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับของไฮโดรเจลด้วย pseudo-second-order kinetic ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการดูดซับของไฮโดรเจลในงานวิจัยนี้

ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม MB ได้ดีกว่าไฮโดรเจล PVOH โดยเมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVOH ที่ 10% เท่ากัน ไฮโดรเจลที่มีปริมาณ 3%DSS เป็นองค์ประกอบร่วมจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ MB เท่ากับ 3.411 mg MB/ g dried hydrogel ในขณะที่ไฮโดรเจลที่มีเฉพาะ PVOH เท่านั้นมีประสิทธิภาพการดูดซับ MB เพียง 1.288 mg MB/ g dried hydrogel ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพที่มากกว่าถึง 2.56 เท่าเมื่อทำการทดสอบในสภาวะที่สารละลาย MB มี pH เริ่มต้นที่ 7.0 ในขณะที่ถ้าใช้สารละลาย MB ที่มี pH เริ่มต้นที่ pH 2.5 ไฮโดรเจลที่มีปริมาณ 3%DSS เป็นองค์ประกอบร่วมจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ MB เท่ากับ 0.671 mg MB/ g dried hydrogel เท่านั้น ในขณะที่ MB เป็นสีย้อมแคทไอออนิกจะถูกดูดซับได้ดีด้วยไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ในสภาวะที่สารละลาย MB มี pH เริ่มต้นเป็นกลางจนถึงเบส แต่ในกรณีของสีย้อม AO_8 ซึ่งเป็นสีย้อมแอนไอออนิกจะให้ผลตรงกันข้าม โดยไฮโดรเจลจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ AO_8 ได้ดีในสภาวะที่สารละลายสีย้อมมี pH 2.5 โดยไฮโดรเจลที่มีปริมาณ 3%DSS เป็นองค์ประกอบร่วมจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ MB เท่ากับ 3.274 mg MB/ g dried hydrogel

กล่าวโดยสรุปได้ว่า ไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม MB และ AO_8 ได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ MB และ AO_8 เป็นแบบจำลองในการศึกษาสีย้อมสังเคราะห์แคทไอออนิกและแอนไอออนิก ตามลำดับ จึงอาจเป็นไปได้ว่าไฮโดรเจลคอมโพสิต DSS/PVOH ก็สามารถกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ตัวอื่นได้ดีเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องมีการพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงในขนาดสเกลใหญ่สำหรับกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมต่อไป

บรรณานุกรม

- AACC (1983) *Approved Methods of Analysis*, American Association of Cereal Chemist, St. Paul, MN.
- AOAC (1990) *Official Methods of Analysis*. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- Akala, E.O., Kopeckova, P. and Kopecek, J. (1998) Novel pH-sensitive hydrogels with adjustable swelling kinetics. *Biomaterials*, 19, 1037-1047.
- Asgher, M and Bhatti, H.N. (2002) Evaluation of thermodynamics and effect of chemical treatments on sorption potential of citrus waste biomass for removal of anionic dyes from aqueous solutions, *Ecological Engineering*, 38, 79-85.
- Asgher, M and Bhatti, H.N. (2012) Evaluation of thermodynamics and effect of chemical treatments on sorption potential of *Citrus* waste biomass for removal of anionic dyes from aqueous solutions. *Ecological Engineering*, 38, 79-85.
- Azap, A.K., Orikin, B., Doviner, V., Nissan, A., Klein, M., Srebnik, M. et al. (2006) *Journal of Controlled Release*., 111, 281-289.
- Bello-Perez, L.A., Rendon-Villalobos, J.R., Agama-Acevedo, E. and Islas-Hernandez, J.J. (2006) *Cereal Chemistry*, 83, 188-193.
- Blanco, M.D., Garcia, O., Trigo, R.M., Teijon, J.M. and Katime, I. (1996) *Biomaterials*, 17, 1061-1067.
- Bryant, C.M. and Hamaker, B.R. (1997) Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. *Cereal Chemistry*, 74, 171-175.,
- Bubacz, K., Choina, J., Dolat, D. and Morawski, A. (2010) Methylene blue and phenol photocatalytic degradation on nanoparticles of anatase TiO₂. *Polish Journal of Environmental Study*, 19, 685-691.
- Chatterjee, S., Chatterjee, T., Lim, S.R. and Woo, S.H. (2011) Effect of the addition mode of carbon nanotubes for the production of chitosan hydrogel corshell beads on adsorption of congo red from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 102, 4402-4409.
- Chiellini, E., Corti, A. and Solaro, R. (1999) Biodegradation of poly(vinyl alcohol) based blow film under different environmental conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 64, 305-312.
- Ciardelli, G. and Ranieri, N. (2001) The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and electroflocculation. *Water Research*, 35, 567-572.
- Ding, J., Chen, L., Ding, Y., Han, W. (2005) *Macromolecular Chemistry and Physics*, 1973-1980.

- Lawal, O.S., Storz, J., Storz, H., Lohmann, D., Lechner, D. and Kulicke, W. (2009) *European Polymer Journal*, 45, 3399-3408.
- Ma, C., Cao, L., Wang, X., Zhang, L., Shi, M. and Wang, J. (2012) Characterization and adsorption capacity of a novel high-performance polymeric sorbent synthesized in supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*, 62, 232-239.
- Mao, L., Imam, S., Gordon, S., Chinelli, P. and Chiellini, E. (2000) Extruded cornstarch-glycerol-polyvinyl alcohol blends: Mechanical properties, morphology and biodegradability. *Journal of Polymers and the Environment*, 8, 205-211.
- Mohanty, K., Naidu, J.T., Meikap, B.C. and Biswas, M.N. (2006) Removal of crystal violet from wastewater by activated carbon prepared from rice husk. *Industrial & Engineering Chemistry*, 45, 1723.
- Park, J.S., Park, J.W. and Ruchenstein, E. (2001) On the viscoelastic properties of poly (vinyl alcohol) and chemically crosslinked poly(vinyl alcohol). *Journal of Applied Polymer Science*, 82, 1816-1823.
- Paulino, A.T., Guiherme, M.R., Reis, A.V., Campese, G.M., Muniz, E.C. and Nozaki, J. (2006) Removal of methylene blue dye from an aqueous media using supersorbent hydrogel supported on modified polysaccharide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 301, 55-62
- Paulino, A. T., Belfiore, L. A., Kubota, L. T., Muniz, E. C., Almeida, V. C., & Tambourgi, E. B. (2011). Effect of magnetite on the adsorption behavior of Pb(II), Cd(II), and Cu(II) in chitosan-based hydrogels. *Desalination*, 275, 187–196.
- Peppas, N.A., and Khare, A.R. (1993) *Advanced Drug Delivery Reviews*, 11, 1-35.
- Peppas, N.A. (1991) *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 6, 241-246.
- Peppas, N.A., Bures, P., Leobandung, W. and Ichikawa, H. (2000) *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 50, 27-46.
- Pimpa, W., Pimpa, C. Jansangsree, P. (2012) Development of biodegradable films based on durian seed starch. *Advanced Material Science*, 506, 311-314.
- Pimpa, W. and Pimpa, C. (2014) Characterization of durian seed starch/PVOH composite hydrogel as a potential adsorbent for removal of hazardous dyes. *Advanced Material Science*, 931-932, 286-290.
- Rafatullah, R., Sulaiman, O., Hashim, R. and Ahmad, A. (2010) Adsorption of methylene blue on low cost adsorbents: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 70-80.

- Dogan, K. (2007) Modeling the mechanism, equilibrium and kinetics for the adsorption of acid orange 8 onto surfactant-modified clinoptilolite: The application of nonlinear regression analysis. *Dyes and Pigments*, 74, 659-664.
- Dragan, A.A. and Apopei, D.F. (2011) Synthesis and swelling behavior of pH-sensitive semi-interpenetrating polymer network composite hydrogels based on native and modified potatoes starch as potential sorbent for cationic dyes. *Chemical Engineering Journal*, 178, 252-263.
- Elvira, C., Mano, J.F., Roman, J.S. and Reis, R.L. (2002) *Biomaterials*, 23, 1955-1966.
- Fennema, O.R. (1985) Food Chemistry, 2nd ed. New York and Basel, Marcel Dekker, Inc., 282-313.
- Garg, V.K., Gupta, R., Yadav, A.B. and Kumar, R. (2003) Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust. *Bioresource Technology* 89: 121-124.
- Ghosh, K., Shu, X.Z., Mou, R., Lombardi, J., Prestwich, G.D., Rafailovich, M.H. et al. (2005) *Biomacromolecules*, 6, 2857-2865.
- Gohi, J.M., Bhattacharya, A. and Ray, P. (2006) Studies on the crosslinking of poly(vinyl alcohol). *Journal of Polymer Research*, 13, 161-169.
- Hasimi, A., Stavropoulou, A., Papadokostaki, K.G. and Sanopoulou, M. (2008) Transport of water in polyvinyl alcohol films: Effect of thermal treatment and chemical crosslinking. *European Polymer Journal*, 44, 4098-4107.
- Hao, O.J. and Kim, P.C. (2000) Decolorization of wastewater. *Environmental Science and Technology*, 30, 449-505.
- He, Y., Zhu, B. and Inoue, Y. (2004) Hydrogen bonds in polymer blends. *Progress in Polymer Science*, 29, 1021-1051.
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 45, 253-267.
- Issac, R.A. (1996) Disinfection chemistry. *Water Environment and Technology*, 8, 47-51.
- Jarowenko, W. (1970) Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol. 12, 787-862.
- Jiuhui, Q.U. (2008) Research progress of novel adsorption process in water purification: A review, *Journal of Environmental Science* 20, 1-13.
- Julino, B.O. (1971) *Tody cereal Science*, 16, 334-360.
- Kamath, K. and Park, K. (1993) *Advanced Drug Delivery Reviews*, 11, 59-84.
- Karadag, E., Saraydin, D., Centinkaya, S. and Guven, O. (1996) *Biomaterials*, 17, 67-70.
- Krumova, M., Lopez, D., Benavente, R., Mijangos, C. and Perena, J.M. (2000) Effect of crosslinking on the mechanical and thermal properties of poly(vinyl alcohol). *Polymer*, 4, 9265-9272.

- Riyajan, S., Chaiponban, S., and Tanbumrung, K. (2009) Investigation of the preparation and physical properties of a novel semi-interpenetrating polymer network based on epoxised NR and PVA using maleic acid as the crosslinking agent. *Chemical Engineering Journal*, 153, 199-205.
- Sanchez-Hernandez, L., Solorza-Feria, J., Mendez-Montealvo, G., Paredes-Lopez, O. and Bello-Perez, L.A. (2002) Isolation and partial characterization of okenia (*Okenia hypogaea*) starch. *Starch/Stärke*, 54, 193-197.
- Seidel, C., Kulicke, W.M., Heb, C., Hartmann, B., Lechner, M.D. and Lazik, W. (2004) *Starch/Stärke*, 56, 157-166.
- Shafee, C.S. and Naguib, H.F. (2003) Water sorption in crosslinked poly(vinyl alcohol) networks. *Polymer*, 44, 1647-1653.
- Siddaramaiah, R.B. and Somshekar, R. (2003) Structure-property relation in polyvinyl alcohol/starch composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 630-635.
- Sin, L.T., Rahman, W.A., Rahman, A.R. and Khan, M.I. (2010) Detection of synergistic interactions of polyvinyl alcohol-cassava starch blends through DSC. *Carbohydrate Polymers*, 79, 224-226.
- Spiridon, I., Popescu, I.C., Bodarlau, R. and Vasile, C. (2008) Enzymatic degradation some nanocomposites of poly(vinyl alcohol) with starch. *Polymer Degradation and Stability*, 93, 1884-1890.
- Takizawa, A., Negishi, T. and Ishikawa, K. (2004) Sorption of water vapour by poly(vinyl alcohol): influence of polymer crystallinity. *Journal of Polymer Science: A1: Polymer Chemistry*, 6, 475-484.
- Tang, W. and Huren, A. (1995) UV/TiO₂ photocatalytic oxidation of commercial dyes in aqueous solutions. *Chemosphere*, 31, 4157-4170.
- Tanigumi, T., Yano, K., Yamaura, K. and Matsuzawa, S. (1995) Anomalous swelling of poly(vinyl alcohol) film in mixed solvents of dimethylsulfoxide and water. *Polymer*, 36, 2941-2946.
- Varshosaz, J. and Koopaie, N. (2002) Cross-linked poly(vinyl alcohol) hydrogels: Study of swelling and drug release behavior. *Iranian Polymer Journal*, 11, 123-131.
- Xiong, H.G., Tang, S.W., Tang, H.L. and Zou, P. (2008) *Carbohydrate Polymer*, 71, 263.
- Yoshimura, T., Matsuo, K. and Fujioka, R. (2006) *Journal of Applied Polymer Science*, 99, 3251-3256.
- Zhai, M., Yoshii, F., Kume, T. and Hashim, K. (2002) *Carbohydrate Polymer*, 50, 295.
- Zhou, C., Lee, S., Dooley, K. and Qinglin, W. (2013) A facile approach to fabricate porous nanocomposite gels based on partially hydrolyzed polyacryamide and cellulose nanocrystals for adsorbing methylene blue at low concentration. *Journal of Hazardous Materials*, xxx, xxx-xxx.

Zollinger, H. (1987) Color chemistry-synthesis, projects and applications of orange dyes and pigments. VCH publisher, New York, 92-102.

