

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาหาค่าประกอบหลักและวิเคราะห์สมบัติขององค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดานโต้คลื่น

จากการศึกษาหาค่าประกอบหลักที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งโดยการวิเคราะห์สารตั้งต้นทั้ง 2 ส่วนที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน นั่นคือ โทลูอินไดไอโซไซยานเนต (toluene diisocyanate : TDI) และสารประกอบพอลิออล (polyol composition) เพื่อใช้ในการจัดหาสารตั้งต้นที่มีความใกล้เคียงหรือเหมาะสมจากผู้ประกอบการในประเทศ พบว่า

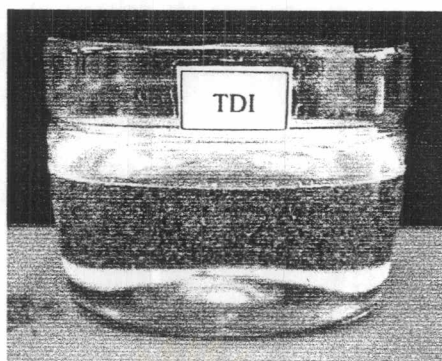
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสารตั้งต้น

4.1.1.1 การศึกษาลักษณะปรากฏ (physical appearance)

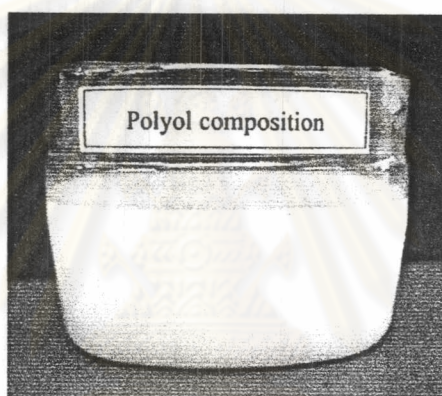
จากการศึกษาลักษณะที่ปรากฏภายนอกของสารตั้งต้นด้วยสายตาได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่

สารตั้งต้น	ลักษณะปรากฏ
โทลูอินไดไอโซไซยานเนต	เป็นของเหลวหนืด สีค่อนข้างใสปนฟ้า ถ้าทิ้งไว้นานๆ สีจะออกเหลืองและขุ่นขึ้น ไม่มีอนุภาคแขวนลอย และมีกลิ่นฉุนมาก
สารประกอบพอลิออล	เป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น และมีกลิ่นเล็กน้อย



รูปที่ 4.1 โทลูอินไดไอโซไซยาเนตที่ผู้ประกอบการใช้อยู่



รูปที่ 4.2 สารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้อยู่

4.1.1.2 การหาค่าความหนืด (viscosity)

จากการหาค่าความหนืดของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดของสารตั้งต้น

สารตั้งต้น	ค่าความหนืด (cps)
โทลูอินไดไอโซไซยาเนต	1929
สารประกอบพอลิออล	1330

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของโพลูอินไดไอโซไซยานเนต (TDI) ที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ พบว่ามีค่าสูงกว่าโพลูอินไดไอโซไซยานเนตทางการค้าปกติมาก (เช่น Suprasec[®] TDI 80/20 ซึ่งมีค่าความหนืด 3.10 cps) [25] กล่าวคือ TDI ที่เป็นของผสมระหว่าง 2,4-TDI และ 2,6-TDI จะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี และมีความหนืดน้อยมาก ดังนั้น TDI ที่ทำการวิเคราะห์นี้น่าจะเป็น TDI ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิยูรีเทนแล้วบางส่วนที่เรียกว่า โพลูอินไดไอโซไซยานเนตพรีพอลิเมอร์ (TDI prepolymer)

4.1.1.3 การตกตะกอน (precipitation)

จากการตกตะกอนของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการตกตะกอนของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด

สารตั้งต้น	ผลการตกตะกอน
โพลูอินไดไอโซไซยานเนต	ไม่มีการตกตะกอนของสารแขวนลอย มีเพียงแต่สารบางส่วนแข็งตัวเป็นผลึก
สารประกอบพอลิออล	เปลี่ยนสีจากสีขาวขุ่นเป็นสีขาวค่อนข้างใส และมีการตกตะกอนของสารแขวนลอยสีขาว

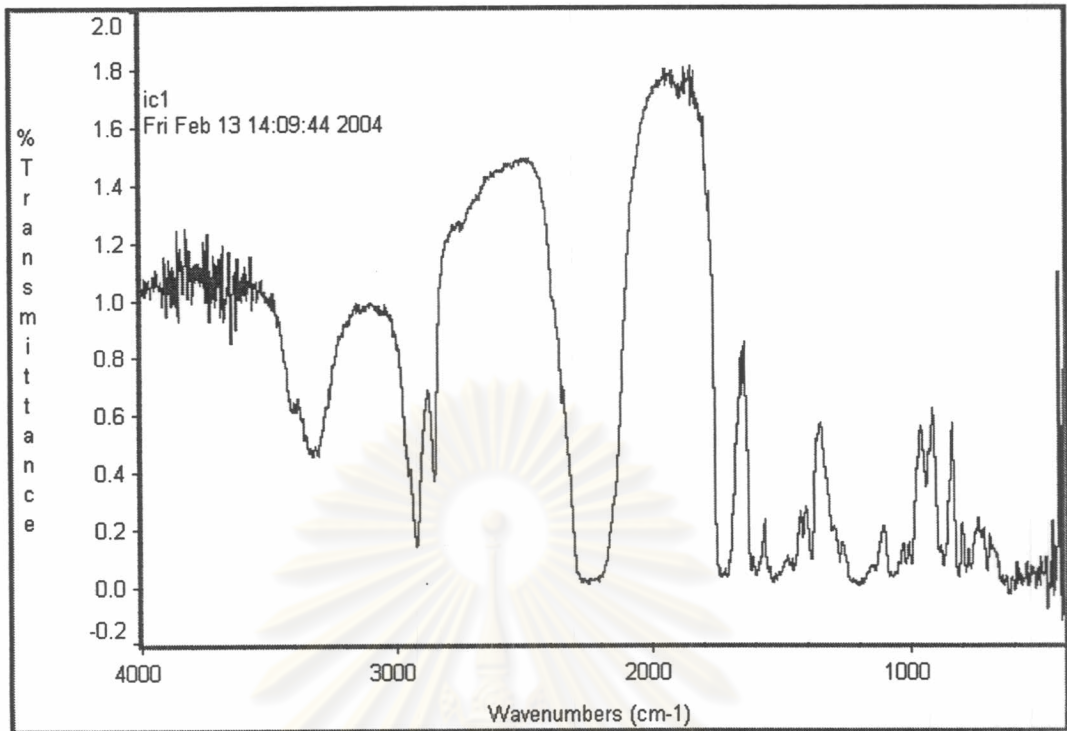
จากตารางที่ 4.3 ผลการตกตะกอนของโพลูอินไดไอโซไซยานเนตที่ไม่พบการตกตะกอนของสารแขวนลอย มีเพียงแต่สารบางส่วนแข็งตัวเป็นผลึก ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากสารตั้งต้นดังกล่าวมีการสัมผัสกับความชื้นภายนอก ซึ่งถือเป็นธรรมชาติของสารประเภทไอโซไซยานเนต และสารประกอบพอลิออลที่มีการตกตะกอนของสารแขวนลอยสีขาว ซึ่งในทางปกติสารแขวนลอยดังกล่าว น่าจะเป็นสารสีขาวที่ใส่ลงไปเพื่อเพิ่มความขาวของชิ้นงาน คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารสีขาวที่มีลักษณะเป็นผงสี (pigment) ที่นิยมใช้ในงานโพลิยูรีเทนนั่นเอง [7]

4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง องค์ประกอบ และสมบัติทางเคมีของสารตั้งต้น

4.1.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

(Infrared Spectroscopy : IR)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยพิจารณาจากหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของโพลูอินไดไอโซไซยานเนต และสารประกอบพอลิออลได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของโทลูอินไดไอโซไซยานตที่ผู้ประกอบการใช้อยู่

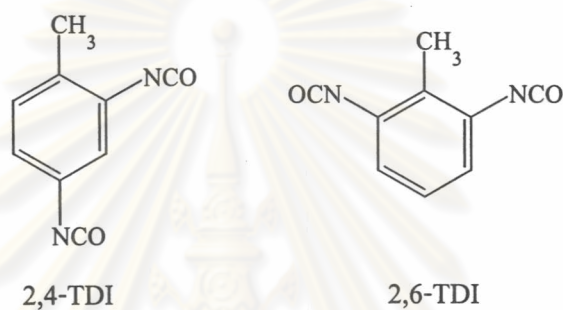
จากรูปที่ 4.3 มีพีคที่สำคัญ ๆ ดังนี้ [18, 26]

ที่ประมาณ $3,340\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของพันธะ N-H
ที่ประมาณ $2,960$ และ $2,870\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของพันธะ C-H (CH_2 , CH_3)
ที่ประมาณ $2,270\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของหมู่ไอโซไซยานต (NCO)
ที่ประมาณ $1,750\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของหมู่เอสเทอร์ (คาร์บอนิล, C=O)
ที่ประมาณ $1,740 - 1,690\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของหมู่ยูรีเทน (urethane)
ที่ประมาณ $1,650\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของหมู่เอไมด์ (amide)
ที่ประมาณ $1,640 - 1,610\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของหมู่ยูเรีย (urea)
ที่ประมาณ $1,613\text{ cm}^{-1}$	เป็นพีคการยืดของพันธะ C=C (วงแหวนเบนซีน)
ที่ประมาณ $1,300 - 1,200\text{ cm}^{-1}$	เป็นการยืดของหมู่อีเทอร์ (C-O-C)

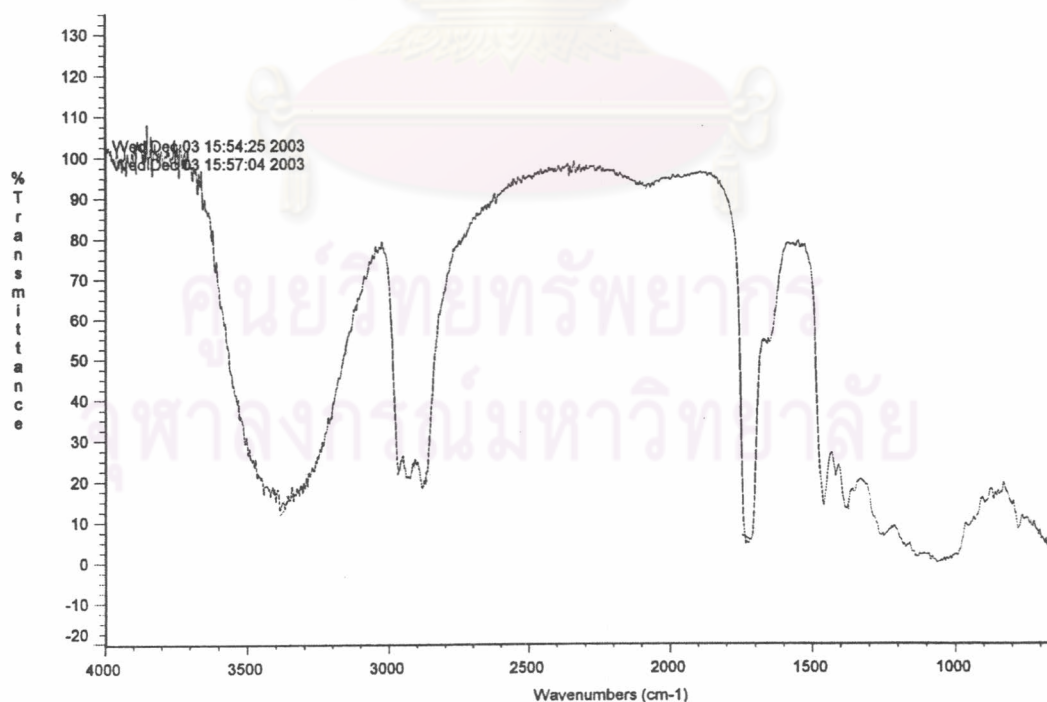
จากอินฟราเรดสเปกตรัมในรูปที่ 4.3 พบว่ามีพีคที่แสดงถึงหมู่ยูรีเทน หมู่ยูเรีย หมู่เอสเตอร์ และหมู่อีเทอร์ (ไม่มีพีคที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล) แสดงให้เห็นว่าโทลูอินไดไอโซไซยานาตดังกล่าวเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไอโซไซยานาตที่มากเกินไปกับพอลิออลเกิดเป็นพอลิยูรีเทนบางส่วน ดังนั้นสารตั้งต้นนี้จึงน่าจะเป็นโทลูอินไดไอโซไซยานาตพรีพอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความหนืด ข้างต้น

หมายเหตุ

สูตรโครงสร้างของ 2,4-TDI และ 2,6-TDI แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของ 2,4-TDI และ 2,6-TDI [5]



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้

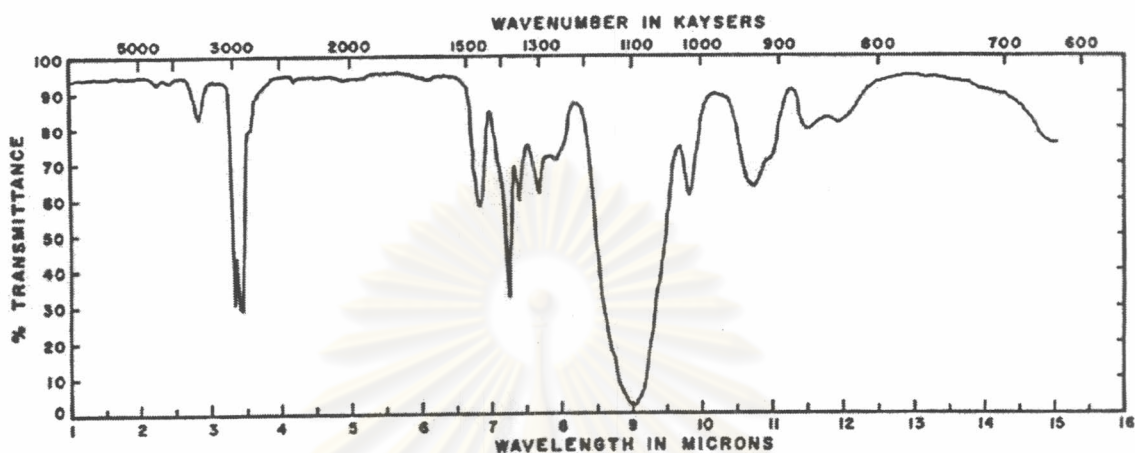
จากรูปที่ 4.5 มีพีคที่สำคัญ ๆ ดังนี้ [27]

ที่ประมาณ 3,600 – 3,200 cm^{-1}	เป็นพีคการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H)
ที่ประมาณ 2,960 และ 2,870 cm^{-1}	เป็นพีคการยืดของพันธะ C-H (CH_2 , CH_3)
ที่ประมาณ 1,720 cm^{-1}	เป็นพีคการยืดของหมู่คาร์บอนิล (C=O)
ที่ประมาณ 1,200 – 1,300 cm^{-1}	เป็นการยืดของหมู่อีเทอร์ (C-O-C)

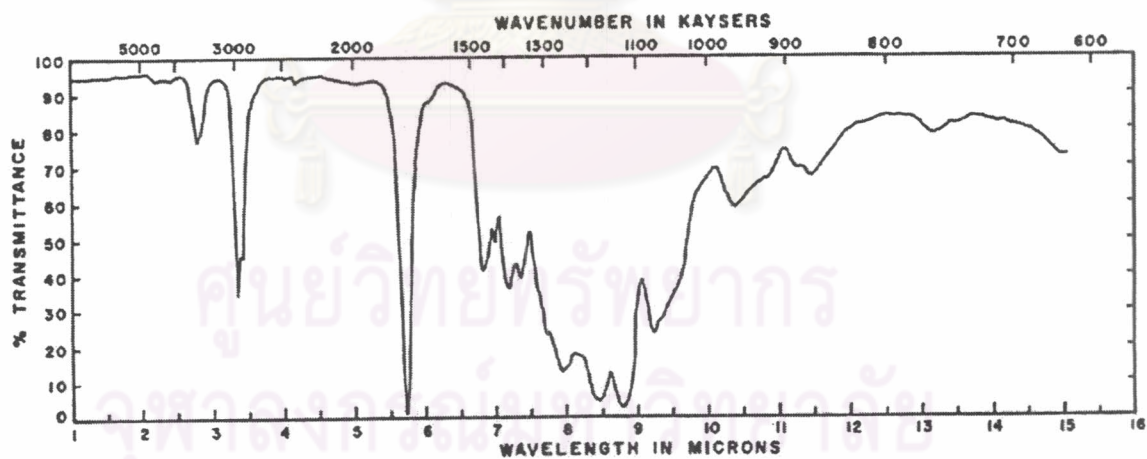
จากอินฟราเรดสเปกตรัมในรูปที่ 4.5 มีพีคการยืดของหมู่ไฮดรอกซิลแสดงว่าน่าจะมีสารประเภทแอลกอฮอล์เป็นองค์ประกอบ อีกทั้งพีคยังมีลักษณะค่อนข้างกว้าง (broad) (เมื่อเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงในรูปที่ 4.6 และ 4.7) แสดงว่าอาจมีน้ำเป็นองค์ประกอบด้วย นอกจากนี้ มีพีคที่แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (น่าจะเป็นหมู่เอสเทอร์) และพีคที่แสดงถึงหมู่อีเทอร์ และเมื่อเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมอ้างอิงของพอลิอีเทอร์พอลิโออล (polyether polyol) ในรูปที่ 4.6 และพอลิเอสเทอร์พอลิโออล (polyester polyol) ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบพอลิโออลที่ผู้ประกอบการใช้มีองค์ประกอบของหมู่อีเทอร์ และ/หรือเอสเทอร์ ซึ่งหมายความว่าสารประกอบพอลิโออลดังกล่าวอาจมีพอลิอีเทอร์พอลิโออล หรือพอลิเอสเทอร์พอลิโออลเป็นองค์ประกอบหลัก หรืออาจเป็นการผสมกันระหว่างพอลิอีเทอร์พอลิโออลและพอลิเอสเทอร์พอลิโออลก็เป็นได้

อย่างไรก็ตาม จากอินฟราเรดสเปกตรัมในรูปที่ 4.5 เป็นการยากที่จะระบุลงไปว่าเป็นพอลิโออลชนิดใด เพราะเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมอ้างอิงจะเห็นได้ว่าสารประกอบพอลิโออลที่ผู้ประกอบการใช้มีพอลิเอสเทอร์พอลิโออลเป็นองค์ประกอบแน่นอน (เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7) แต่เป็นการยากที่จะยืนยันได้ว่ามีพอลิอีเทอร์พอลิโออลหรือไม่ เนื่องจากพีคในช่วงเลขคลื่น (wave number) ที่ต่ำกว่า 1,500 cm^{-1} ลงไปของทั้งพอลิอีเทอร์พอลิโออล และพอลิเอสเทอร์พอลิโออลมีลักษณะคล้ายคลึงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



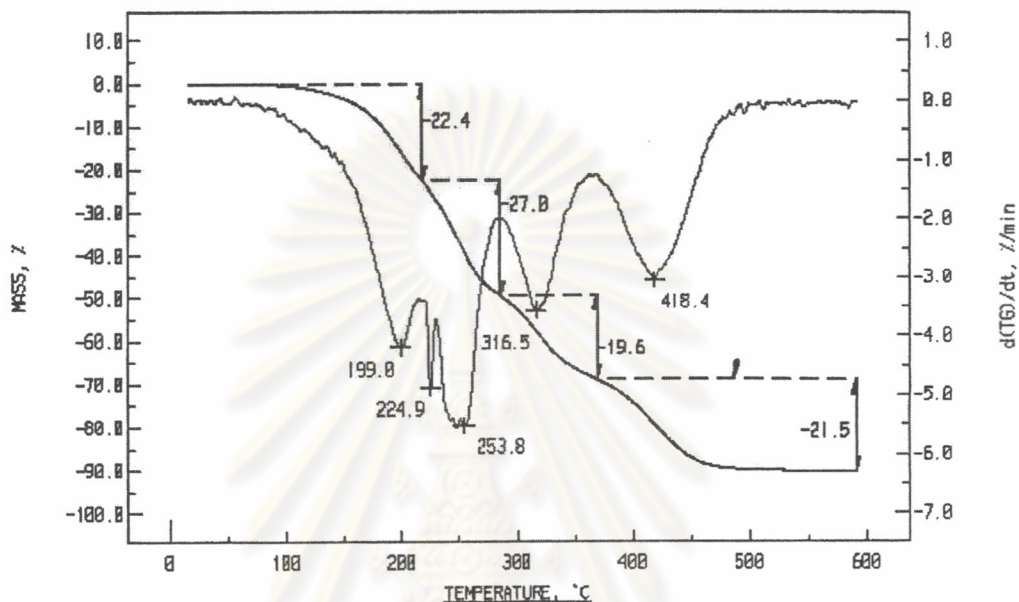
รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมอ้างอิงของพอลิเอธิลเทอร์พอลิออล [26]



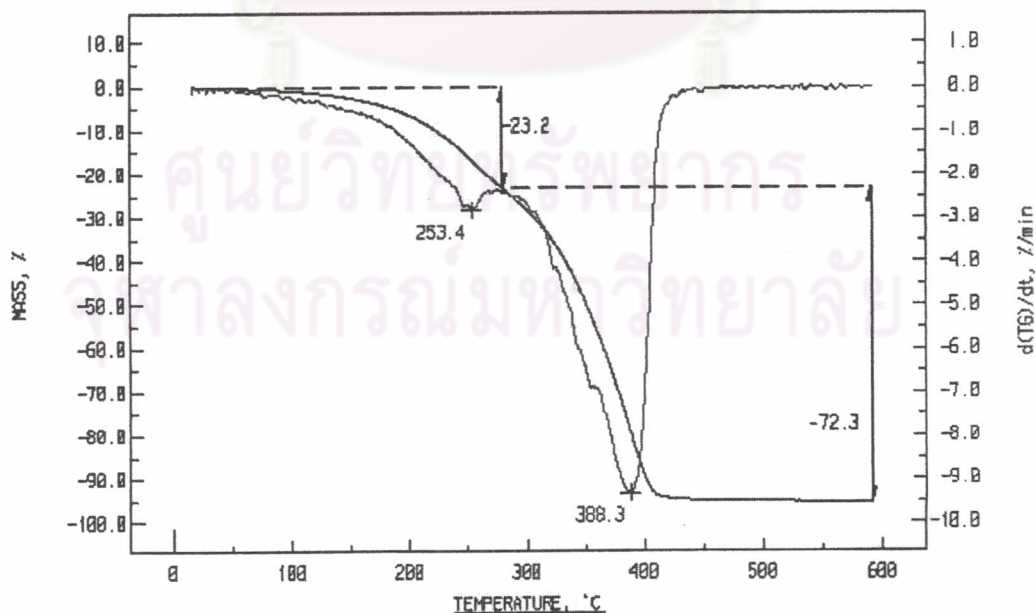
รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมอ้างอิงของพอลิไอโซเทอร์พอลิออล [26]

4.1.2.2 การวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราวิเมตรี (TGA)

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของโทลูอินไดไอโซไซยานเนต และสารประกอบพอลิออลได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 เทอร์โมแกรม (TGA curve) ของโทลูอินไดไอโซไซยานเนตที่ผู้ประกอบการใช้อยู่



รูปที่ 4.9 เทอร์โมแกรมของสารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้อยู่

จากเทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.8 สารตั้งต้นโทลูอินไดไอโซไซยานตมีการสลายตัวทางความร้อนในหลายระดับอุณหภูมิโดยดูจากน้ำหนักที่สูญเสีย (weight loss) แสดงให้เห็นว่าน่าจะมีการหลุดออกไปของสารโมเลกุลเล็ก ๆ หลายชนิด ซึ่งน่าจะเป็นโมเลกุลสายโซ่สั้น ๆ ของพอลิยูรีเทน โมเลกุลของยูเรีย และไอโซไซยานต เป็นต้น ซึ่งก็สอดคล้องกับผลในข้อ 4.1.1.2 และ 4.1.2.1

และจากเทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.9 สารประกอบพอลิออลมีการสลายตัวทางความร้อนเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส แสดงว่าเริ่มมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำ (สอดคล้องกับรูปที่ 4.5 และหัวข้อถัดไปคือ 4.1.2.6) และจากลักษณะเส้นโค้งการสลายตัวที่กว้างแสดงว่ามีโมเลกุลของสารที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ใกล้เคียงกันเป็นองค์ประกอบ

4.1.2.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเพอร์มีเอชันโครมาโทกราฟี (Gel Permeation Chromatography : GPC)

จากการหาน้ำหนักโมเลกุลของโทลูอินไดไอโซไซยานต และสารประกอบพอลิออลด้วยเทคนิคเจลเพอร์มีเอชันโครมาโทกราฟี ได้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้

สารตั้งต้น	น้ำหนักโมเลกุล ณ จุดยอดพีค (M_p)
โทลูอินไดไอโซไซยานต (TDI)	1.4×10^3
	8.5×10^2
	5.9×10^2
	3.7×10^2
	2.5×10^2
	1.5×10^2
สารประกอบพอลิออล (Polyol composition)	4.4×10^3
	1.7×10^3
	1.4×10^3
	1.0×10^3
	6.2×10^2
	2.5×10^2
	1.7×10^2

***ข้อมูลดิบ (raw data) แสดงในภาคผนวก ก-3

หมายเหตุ

โดยทั่วไปการรายงานค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสารพอลิเมอร์มักนิยมรายงานเป็นค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (number-average molecular weight : M_n) และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (weight-average molecular weight : M_w) แต่เนื่องจากสารตัวอย่างทั้งสองประกอบด้วยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน คือ ตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณ 10-16 นาที และพีคขององค์ประกอบดังกล่าวแยกออกจากกันไม่สมบูรณ์ ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างจึงถูกรายงานด้วยน้ำหนักโมเลกุล ณ จุดยอดพีค (peak molecular weight : M_p)

จากตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ กรีนิชของโทลูอินไดไอโซไซยานาต ประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ต่าง ๆ กัน และค่าที่ได้สูงกว่าโทลูอินไดไอโซไซยานาตปกติมาก (ปกติโทลูอินไดไอโซไซยานาตทางการค้ามีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 174.16) [5] นั่นหมายความว่าโทลูอินไดไอโซไซยานาตนี้น่าจะเป็น โทลูอินไดไอโซไซยานาตพรีพอลิเมอร์อย่างแน่นอน (สอดคล้องกับหัวข้อ 4.1.1.2 4.1.2.1 และ 4.1.2.2)

ส่วนสารประกอบพอลิออลก็เช่นกัน ประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสารตั้งต้นดังกล่าวมีองค์ประกอบของพอลิออลหลายชนิด หรืออาจมีเพียงองค์ประกอบเดียวแต่มีสายโซ่โมเลกุล (polymer chain) ที่มีขนาดต่างกันก็ได้ อย่างไรก็ตามพบว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงของพอลิออลสำหรับเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น และชนิดแข็ง (ดังแสดงข้อมูลเพิ่มเติมในตารางที่ 4.5) ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าสารประกอบพอลิออลนี้อาจเป็นการผสมกันระหว่างพอลิออลสำหรับเตรียมโฟมชนิดยืดหยุ่น และ/หรือชนิดแข็ง ก็เป็นไปได้

ตารางที่ 4.5 ความแตกต่างระหว่างพอลิออลสำหรับเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น และชนิดแข็ง [5]

Characteristic	Flexible foams and elastomers	Rigid foams, rigid plastics and stiff coatings
Molecular weight range	1,000-6,500	150-1,600
Functionality range	2-3	3-8
Hydroxyl value range (mg KOH/g)	28-160	250-1,000

4.1.2.4 การหาค่าไอโซไซยานเนตคอนเทนต์ (NCO content หรือ % NCO by wt.) ในโพลูอินไดไอโซไซยานเนต

จากการหาค่าร้อยละโดยน้ำหนักของหมู่ไอโซไซยานเนตที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของสารตัวอย่างโพลูอินไดไอโซไซยานเนต พบว่าสารตัวอย่างมีค่า NCO content เท่ากับ 28

จากผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น (โพลูอินไดไอโซไซยานเนต) ดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นทั้งหมด (หัวข้อ 4.1) สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการจัดหาสารเคมีสำหรับการเตรียมโพลีพอลิยูรีเทน (ส่วนของโพลูอินไดไอโซไซยานเนต) ที่มีความว่องไวของหมู่ไอโซไซยานเนต และมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสารตั้งต้นจากต่างประเทศมากที่สุด โดยการจัดหาโพลูอินไดไอโซไซยานเนตที่มีจำหน่ายในประเทศ ในปัจจุบันนั้นพบว่ามียู่ 1 ชนิดที่มีลักษณะเป็นพรีพอลิเมอร์ และมี NCO content ใกล้เคียงมากที่สุด คือ โพลูอินไดไอโซไซยานเนตพรีพอลิเมอร์ ที่มีชื่อทางการค้าว่า BX 9201 (มี NCO content ประมาณ 32)

4.1.2.5 การหาค่าไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซิลนัมเบอร์ (Hydroxyl value : OHV หรือ Hydroxyl number) ของสารประกอบพอลิออล

จากการหาค่า OHV เฉลี่ยของสารประกอบพอลิออล พบว่าสารตัวอย่างมีค่า OHV เท่ากับ 209.98 mgKOH/g

และจากผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น (สารประกอบพอลิออล) ดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นทั้งหมด (หัวข้อ 4.1) สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการจัดหาสารเคมีสำหรับการเตรียมโพลีพอลิยูรีเทน (ส่วนของพอลิออล) ที่มีความใกล้เคียงกับสารตั้งต้นจากต่างประเทศเช่นกัน อย่างไรก็ตาม พอลิออลที่เหมาะสมและสามารถจัดหาได้ภายในประเทศ ประกอบด้วยพอลิเอสเทอร์พอลิออล และพอลิอีเทอร์พอลิออลที่มีค่า OHV ต่างกันไปตั้งแต่ 55 จนถึง 640 แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีพอลิออลชนิดใดที่มีค่า OHV ตรงกับสารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ ดังนั้นค่าไฮดรอกซิลที่คำนวณได้ข้างต้นจึงมีความสำคัญในการเลือกใช้พอลิออลที่จะผสมกันในการออกสูตรโพลีที่ต้องพิจารณาให้มีค่า OHV เฉลี่ยใกล้เคียงกับสารตั้งต้นดังกล่าว

4.1.2.6 การหาปริมาณน้ำ (water content) ของสารประกอบพอลิออล

จากการหาปริมาณน้ำที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ NCO 2 หมู่ พบว่าสารตัวอย่างมีค่า water content เท่ากับ 5.5 % wt ซึ่งค่านี้ทำให้ทราบปริมาณการใช้สารฟู (น้ำกลั่น) อย่างคร่าว ๆ ในการออกสูตรโพลีพอลิยูรีเทนชนิดแข็งต่อไป (ในข้อ 3.2.8)

4.2 ผลวิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา (reaction profile) ของโฟมต้นแบบ

4.2.1 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิการเก็บสารตั้งต้นประมาณ 30-32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง

ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมต้นแบบที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ใน ปัจจุบัน เมื่อเก็บสารตั้งต้นไว้ที่อุณหภูมิห้องและทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ เมื่อเก็บสารตั้งต้นที่อุณหภูมิห้อง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง

cream time (ct) (วินาที)	gel time (gt) (วินาที)	tact free time (tft) (วินาที)
28-32	110-115 (1.50-1.55 นาที)	260-270 (4.20-4.30 นาที)

4.2.2 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิการเก็บสารตั้งต้นประมาณ 6-8 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง

ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมต้นแบบที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ใน ปัจจุบัน เมื่อเก็บสารตั้งต้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิสารตั้งต้นประมาณ 6-8 องศาเซลเซียส) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 4.7

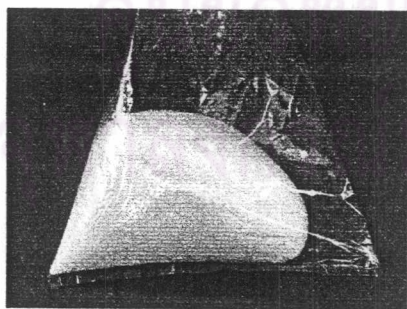
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ เมื่อเก็บสารตั้งต้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิสารตั้งต้น 6-8 องศาเซลเซียส) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง

cream time (ct) (วินาที)	gel time (gt) (วินาที)	tact free time (tft) (วินาที)
100-110 (1.40-1.50 นาที)	230-240 (3.50-4.00 นาที)	510-520 (8.30-8.40 นาที)

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงการเก็บข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมต้นแบบเพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยผลที่ได้ในตารางที่ 4.6 จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเตรียมโฟมที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นภาวะที่ง่าย และมีความสะดวกที่สุด ส่วนผลที่ได้จากตารางที่ 4.7 จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเตรียมโฟมที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นภาวะที่ผู้ประกอบการใช้อยู่จริงในปัจจุบัน (เป็นค่าที่ต้องการจริง ๆ) ดังนั้นในการทดลองจึงเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิห้องโดยพยายามทำให้โฟมตัวอย่างที่ได้มีข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับตารางที่ 4.6 ก่อน แล้วจึงลดอุณหภูมิสารตั้งต้นให้ต่ำลงเพื่อปรับให้ได้โฟมตัวอย่างที่มีข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับภาวะจริงที่ผู้ประกอบการต้องการ ทั้งนี้ทางผู้ประกอบการมีความประสงค์ให้โฟมตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมีเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบมากที่สุด โดยเฉพาะค่า cream time ซึ่งมีความสำคัญในการขึ้นรูปโฟม กล่าวคือต้องพยายามเตรียมโฟมตัวอย่างให้มีค่า cream time ที่เทียบเท่าหรือสูงกว่า โฟมต้นแบบ เพราะถ้าค่า cream time น้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถปั่นผสมสารตั้งต้นให้เข้ากันและเทใส่แม่แบบได้ทันเวลาเนื่องจากโฟมจะเริ่มฟูตัวเสียก่อน

4.3 ผลการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้

จากการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้สารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า โฟมพอลิยูรีเทนเกิดการฟูตัวอย่างอิสระ เนื่องจากเป็นการเตรียมโฟมในแม่แบบเปิดนั่นเอง ซึ่งโฟมที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้จะใช้เป็นโฟมต้นแบบในการทดลองในขั้นตอนนี้ต่อไป



รูปที่ 4.10 โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดานโต้คลื่นจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่

4.4 ผลการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างโคมพอลิยูรีเทนต้นแบบ

จากชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 4.3 สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพได้ดังนี้

4.4.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงานตัวอย่าง

จากการตรวจดูลักษณะภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากทิ้งชิ้นงานไว้ 1-2 วัน พบว่าโคมที่ได้มีสีขาว (ขาวฟ้า) มีความแข็งไม่หืดตัว สามารถหักงอได้เล็กน้อย มีรูพรุนเล็กน้อย และมีเซลล์ที่ละเอียดดีมาก แสดงดังรูปที่ 4.11



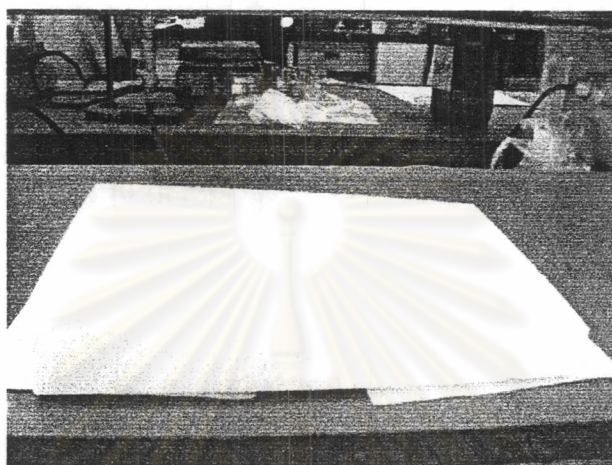
รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวาง (cross-section) ของโคมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดาน ได้คลื่นจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่

4.4.2 การหาค่าความหนาแน่น (density)

จากการหาค่าความหนาแน่นของโคมที่ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระ (free rise density) พบว่าโคมตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นประมาณ 31-34 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

4.5 ผลการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดาษไต้กลั่น

จากการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดาษไต้กลั่นที่ผู้ประกอบการเตรียมได้ในปัจจุบัน โดยอาศัยสารตั้งต้นจากต่างประเทศ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.12 ได้ผลดังนี้



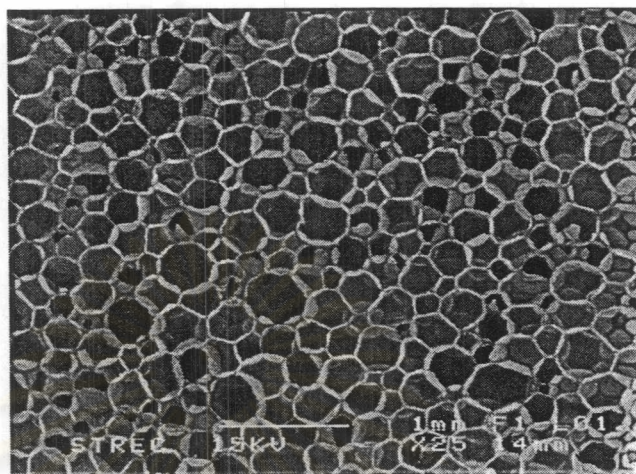
รูปที่ 4.12 ลักษณะชิ้นงานโพลิผลิตภัณฑ์กระดาษไต้กลั่นบางส่วน

4.5.1 การหาค่าความหนาแน่น (density)

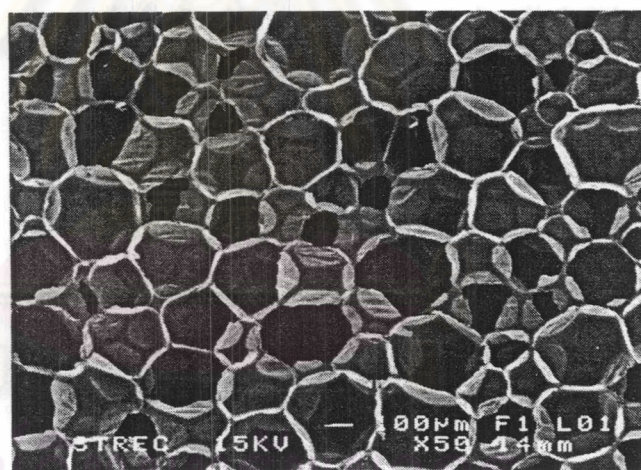
จากการหาค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กระดาษไต้กลั่นในส่วนกลางของชิ้นงาน (core density) พบว่าโพลิตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นประมาณ 40-45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของโพลิมีค่าสูงกว่าในข้อ 4.4.2 แม้เตรียมจากสารตั้งต้นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระดาษไต้กลั่นในทางการค้า หรือในการผลิตจริงนั้นต้องทำในแม่แบบปิด (closed-mold) ซึ่ง ณ จุดนี้ส่งผลให้โพลิถูกอัด จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของโพลิดังกล่าวเพิ่มขึ้น

4.5.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา (morphology)

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างของเซลล์โพลิของผลิตภัณฑ์กระดาษไต้กลั่นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเซลล์มีขนาดประมาณ 200-300 ไมโครเมตร มีลักษณะเป็นเซลล์ปิดเกือบทั้งหมด และเซลล์มีลักษณะสม่ำเสมอดี อีกทั้งเซลล์โพลิทั้ง 2 ทิศทางของการฟูตัวมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14



(1)

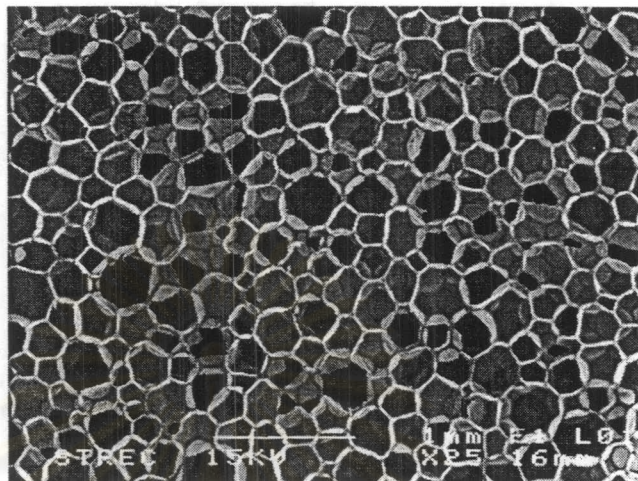


(2)

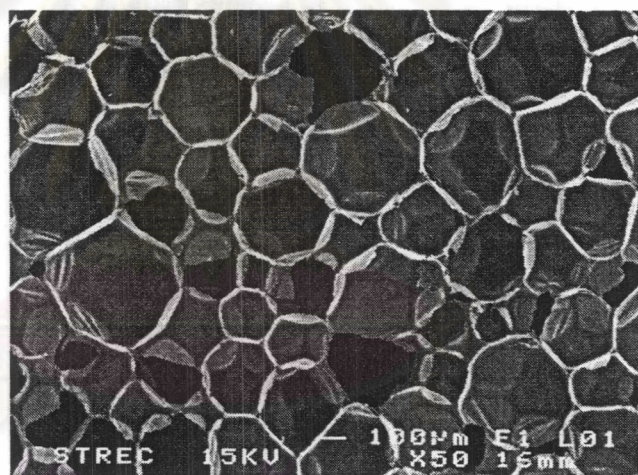
ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของโฟมตัวอย่างในทิศทางขนานกับการฟู่ตัว

(1) กำลังขยาย 25 เท่า (2) กำลังขยาย 50 เท่า



(1)



(2)

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของโฟมตัวอย่างในทิศทางตั้งฉากกับการฟู่ตัว

(1) กำลังขยาย 25 เท่า (2) กำลังขยาย 50 เท่า

4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นที่ผู้ประกอบการเตรียมได้ในปัจจุบัน โดยอาศัยสารตั้งต้นจากต่างประเทศได้ผลดังนี้

4.6.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด (compression test)

จากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานแรงกดของชิ้นงาน โฟมผลิตภัณฑ์

ตัวอย่าง	หมายเลข ชิ้นงาน	ความต้านทานแรงกด (เมกะปาสคาล)	มอดูลัสของ แรงกด (เมกะปาสคาล)	ภาระรับแรงกดสูงสุด ที่การเปลี่ยนแปลง รูปร่าง 10 % (นิวตัน)
ผลิตภัณฑ์โฟม	1	0.17	4.14	603.5
พอลิยูรีเทน	2	0.15	3.69	529.7
ชนิดแข็ง	3	0.17	4.72	595.5
ค่าเฉลี่ย		0.16	4.18	576.2
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.01	0.52	40.5

4.6.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (bending or flexural test)

จากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความต้านทานแรงค้ำโค้งของชิ้นงานโพลีเอทิลีน

ตัวอย่าง	หมายเลข ชิ้นงาน	ความต้านทาน แรงค้ำโค้งสูงสุด (เมกะปาสคาล)	โมดูลัสของ แรงค้ำโค้ง (เมกะปาสคาล)	ภาระรับแรงค้ำโค้งสูงสุด (นิวตัน)
ผลิตภัณฑ์โพลีเอทิลีน ชนิดแข็ง	1	0.77	10.39	51.24
	2	0.72	10.08	47.78
	3	0.73	7.69	48.64
	4	0.64	7.62	42.92
	5	0.76	7.78	50.35
ค่าเฉลี่ย		0.72	8.71	48.19
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.05	1.40	3.24

4.6.3 การทดสอบความแข็ง (hardness test)

จากการทดสอบความแข็ง หรือความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอยของชิ้นงาน ได้ผลดัง
ตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความแข็งของชิ้นงานโพลีเอทิลีน

ตัวอย่าง	หมายเลข ชิ้นงาน	ความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย (indentation hardness) (นิวตัน)
ผลิตภัณฑ์ โพลีเอทิลีน ชนิดแข็ง	1	69.00
	2	69.50
	3	67.00
ค่าเฉลี่ย		68.50
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.32

จากผลการศึกษาหาค่าประกอบหลักและวิเคราะห์สมบัติขององค์ประกอบหลักที่ใช้ใน
การผลิตโพลีเอทิลีนสำหรับทำกระดานโต้คลื่น รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของ

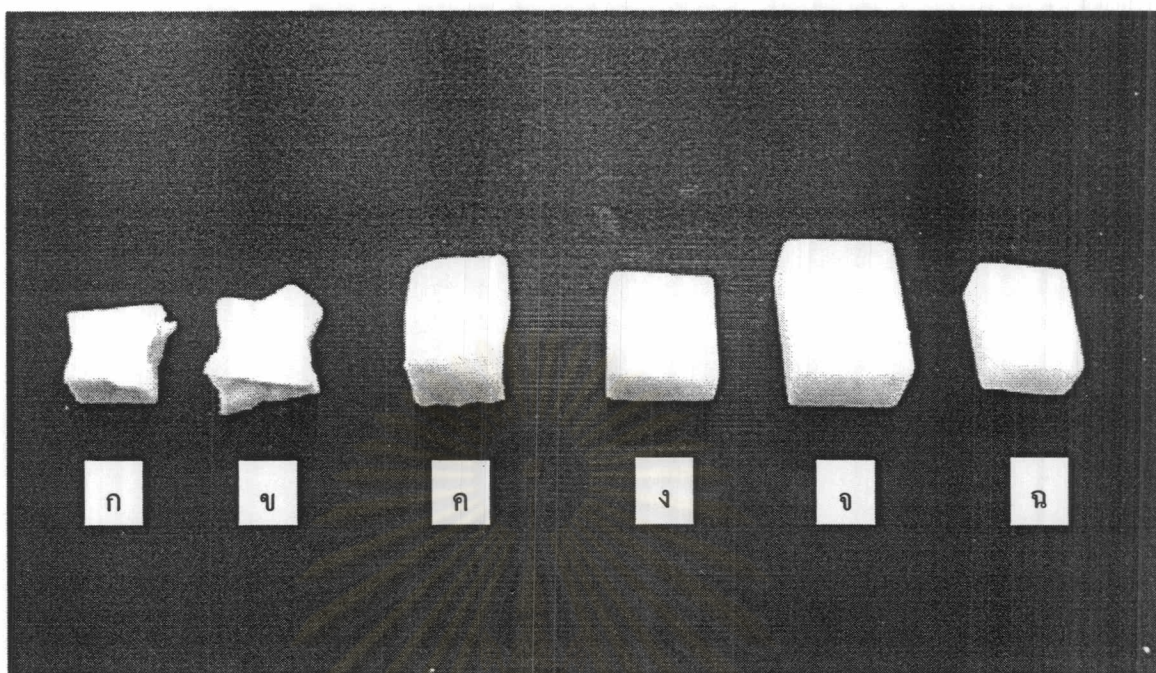
โพนันแบบ และการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของผลิตภัณฑ์ กระดาษโด้คิ่นที่ผู้ประกอบการผลิตได้ในปัจจุบัน โดยใช้สารตั้งต้นที่นำเข้ามาจากต่างประเทศนั้น เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการเตรียม โพนันพอลิยูรีเทนในลักษณะเดียวกัน แต่ใช้สารตั้งต้นที่จัดหาได้จากภายในประเทศ ดังนั้นจึงได้นำข้อมูลดังกล่าวข้างต้นไปประกอบในการจัดหาสารเคมีจากภายในประเทศที่มีความใกล้เคียงและเหมาะสมสำหรับการเตรียมชิ้นงาน โพนันพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับทำกระดาษโด้คิ่น อาทิ เช่น ไอโซไซยานเนต พอลิออล สารเร่งปฏิกิริยา สารฟู สารลดแรงตึงผิว และสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่มีความจำเป็นได้ดังแสดงในหัวข้อ 3.1

4.7 ผลการเตรียมชิ้นงานโพนันพอลิยูรีเทนเบื้องต้นจากพอลิออล (polyol) ที่จัดหาได้ภายในประเทศ แต่ละชนิด

จากการเตรียมชิ้นงาน โพนันพอลิยูรีเทนเบื้องต้นจากพอลิออลที่จัดหาได้ภายในประเทศแต่ละชนิดได้ผลดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.11 ลักษณะการเกิดโพนันและชิ้นงานโพนันพอลิยูรีเทนเบื้องต้นที่ได้จากพอลิออล แต่ละชนิด

พอลิออล	ลักษณะการเกิดโพนันและโพนันที่ได้	free rise density (kg/m ³)
ReA 8411	การฟูตัวช้าและแห้งช้ามาก ขนาดเซลล์โพนันใหญ่ไม่สม่ำเสมอ อ่อนนุ่ม และเกิดการหดตัวสูง	42.80
ReA 8770	เหมือนผลที่ได้จาก ReA 8411	36.63
RP 3003	การฟูตัวช้าและแห้งช้ามาก เซลล์โพนันมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่มีขนาดเล็กกว่าที่ได้จาก ReA 8411 และ ReA 8770	98.85
RP 4260	ค่อย ๆ ฟูตัวอย่างช้า ๆ เซลล์โพนันค่อนข้างละเอียด แต่ไม่สม่ำเสมอ มีรูพรุนปะปน มีความแข็งดี และไม่หดตัว	35.18
RP 4414	ค่อย ๆ ฟูตัวอย่างช้า ๆ เซลล์โพนันค่อนข้างหยาบ ไม่สม่ำเสมอ มีรูพรุนปะปน มีความแข็งแต่เปราะ (brittle) และไม่หดตัว	32.72
RP 4010	การฟูตัวเร็วมากเกินไป เซลล์โพนันละเอียดดีมาก มีรูพรุนเล็กน้อย โพนันมีความแข็งและเหนียวดี ไม่หดตัว	29.17



รูปที่ 4.15 ลักษณะชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้นที่ได้จากพอลิออลแต่ละชนิด

ก) ReA 8411 ข) ReA 8770 ค) RP 3003
 ง) RP 4260 จ) RP 4414 ฉ) RP 4010

4.8 ผลการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนตามแผนการทดลองในภาวะที่กำหนด

จากการทดลองเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนตามแผนที่วางไว้ในข้อ 3.2.9 ที่เน้นการออกสูตรโฟมเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 : หาชนิดและปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 2 : หาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม

สำหรับการออกสูตรในหัวข้อนี้จะอ้างอิงผลที่ได้ในข้อ 4.7 เป็นเกณฑ์ ก็จะพิจารณาผลที่ได้จากการเตรียมชิ้นงานโฟมจากพอลิออลทั้ง 6 ชนิดดังกล่าว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : หาชนิดและปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

จากผลการทดลองในข้อ 4.7 พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ค่อนข้างดีในทุกด้าน อาทิ เซลล์โฟมค่อนข้างละเอียด ชิ้นงานไม่หดตัว ความหนาแน่นไม่สูง และการฟุ้งของโฟมไม่เร็วเกินไป (เวลาการเกิดปฏิกิริยาเหมาะสม) นั่นคือชิ้นงานที่ได้จากสูตรที่ใช้พอลิออลพื้นฐาน RP4260

ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงนำเอาสูตรดังกล่าว (RP 4260) มาแปรผันชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาตามแผนในข้อ 3.2.9 ซึ่งข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมตัวอย่างเทียบกับโฟมต้นแบบที่อุณหภูมิห้องแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมตัวอย่างเทียบกับโฟมต้นแบบเมื่อเก็บสารไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ชิ้นงาน	สารเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา (pbw)	cream time (ct) (วินาที)	gel time (gt) (วินาที)	tact free time (tft) (วินาที)	free rise density (kg/m ³)
<u>ต้นแบบ</u>	<u>ไม่ทราบ</u>	<u>ไม่ทราบ</u>	<u>28-32</u>	<u>110-115</u>	<u>260-270</u>	<u>30-35</u>
ตัวอย่าง (RP 4260)	DMCHA	0.2	20-25	290-300	840-860	35.18
		0.4	14-15	143-150	750-760	33.70
		0.6	9-11	115-125	535-540	32.35
	DMEA	0.2	12-15	310-320	1350-1380	36.27
		0.4	16-18	264-270	935-940	34.11
		0.6	20-22	230-240	825-830	33.48
	33-LV	0.2	28-30	320-330	1140-1200	38.99
		0.4	25-27	255-260	680-690	35.53
		0.6	20-22	190-195	540-550	34.40
	PC 5	0.2	10-15	250-260	1005-1020	35.11
		0.4	9-10	160-165	480-490	33.88
		0.6	6-8	145-150	395-400	33.31

จากตารางที่ 4.12 พบว่าสารเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ผลของการเกิดปฏิกิริยาหรือเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโพลีเมอร์ตัวอย่างใกล้เคียงกับชิ้นงานต้นแบบ ณ ภาวะที่เก็บสารและทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องมากที่สุด คือสารเร่งปฏิกิริยา Solⁿ of 33 % triethylenediamine and 67 % dipropylene glycol (Dabco[®] 33-LV, trade name) ที่ปริมาณ 0.6 pbw (เทียบกับพอลิออลทั้งหมด 100 pbw) ซึ่งผลที่ได้นี้จะถูกใช้ในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 : หาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม

เมื่อได้ชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้วในขั้นตอนที่ 1 จึงทำการออกสูตรโพลีเมอร์เพื่อหาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม โดยมีจำนวนสูตรทั้งสิ้น 46 สูตร ผลการทดลองพบว่าในสูตรที่มีการผสมพอลิออลพื้นฐานที่ทำให้ชิ้นงานอ่อนนุ่ม (ReA 8411, ReA 8770 หรือ RP 3003) ในปริมาณที่สูง คือตั้งแต่ร้อยละ 50 ของพอลิออลทั้งหมดขึ้นไป จะทำให้โพลีเมอร์อ่อนนุ่มมากเกินไป และมีการหดตัวสูง อีกทั้งยังทำให้ความหนาแน่นของโพลีเมอร์สูงเกินไป

นอกจากนี้ในสูตรที่มีการใส่ RP 4010 ลงไป พบว่าปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์จะเกิดอย่างรวดเร็ว ทำให้ในบางสูตรที่มี RP 4010 เป็นองค์ประกอบไม่สามารถปั้นผสมให้เข้ากันได้ทันก่อนที่โพลีเมอร์จะเกิดการฟูตัว ทั้งที่คงปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาให้เท่ากันทุกสูตรนั้น แสดงว่า RP 4010 น่าจะเป็นพอลิออลที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเร่งปฏิกิริยาในตัว (self-catalyst) แต่อย่างไรก็ตามในสูตรที่มีการใช้ RP 4010 นั้นผลของโพลีเมอร์ที่ได้มีลักษณะที่ดีคือมีเซลล์โพลีเมอร์ที่ละเอียด (มีรูพรุนเล็กน้อย) ชิ้นงานมีความแข็งดี ความหนาแน่นต่ำ และส่วนใหญ่ไม่หดตัว ในทางตรงกันข้ามสูตรที่ไม่มีการใส่ RP 4010 เซลล์โพลีเมอร์ที่ได้จะค่อนข้างมีความหยาบ มีรูพรุน ชิ้นงานเปราะ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่มีข้อดีเมื่อไม่มีการใส่ RP 4010 คือเวลาในการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างใกล้เคียงกับโพลีเมอร์ต้นแบบ

ดังนั้นจึงต้องทำการปรับสูตรเพิ่มเติมให้มีความเหมาะสมทั้งทางด้านลักษณะของโพลีเมอร์และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยการปรับสูตรนั้นจะเลือกปรับสูตรเฉพาะสูตรที่ค่อนข้างดี ซึ่งผลจากการคัดเลือกสูตรโพลีเมอร์จะแสดงในหัวข้อถัดไป (ข้อ 4.9)

4.9 ผลการคัดเลือกสูตรโพลีเมอร์พอลิยูรีเทนจากการออกสูตรโพลีเมอร์ในระดับห้องปฏิบัติการเทียบกับโพลีเมอร์พอลิยูรีเทนต้นแบบ

จากการพิจารณาทั้งด้านลักษณะของโพลีเมอร์รวมถึงข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโพลีเมอร์สามารถคัดเลือกสูตรโพลีเมอร์ที่เหมาะสม และสมควรทำการปรับปรุงสูตรต่อไป เพื่อให้ได้สมบัติใกล้เคียงกับโพลีเมอร์ต้นแบบยิ่งขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการคัดเลือกสูตรโพนพอลิยูรีเทนจากการออกสูตรโพนในระดับห้องปฏิบัติการ

ลักษณะ พอลิออล	สูตรส่วนผสมของพอลิออล (จากการกำหนดตัวแปร)	ปริมาณของพอลิออลแต่ละชนิด (จากพอลิออลทั้งหมด 100 pbw) (pbw)	จำนวนสูตร ที่เหลือ (สูตร)
(อ่อน : แข็ง, 1 : 1)	(F1,R1) (F1,R2) (F1,R3) (F2,R1) (F2,R2) (F2,R3) (F3,R1) (F3,R2) (F3,R3)	50	1
(อ่อน : แข็ง, 1 : 2)	(F1,R1,R2) (F1,R2,R3) (F1,R3) (F2,R1,R2) (F2,R2,R3) (F2,R3) (F3,R1,R2) (F3,R2,R3) (F3,R3)	33.33	5
(อ่อน : แข็ง, 2 : 1)	(F1,F2,R1) (F1,F2,R2) (F1,F2,R3) (F1,F3,R1) (F1,F3,R2) (F1,F3,R3) (F2,F3,R1) (F2,F3,R2) (F2,F3,R3)	33.33	-
(อ่อน : แข็ง, 1 : 3)	(F1,R1,R2,R3) (F2,R1,R2,R3) (F3,R1,R2,R3)	25	3
(อ่อน : แข็ง, 2 : 2)	(F1,F2,R1,R2) (F1,F2,R1,R3) (F1,F2,R2,R3) (F1,F3,R1,R2) (F1,F3,R1,R3) (F1,F3,R2,R3) (F2,F3,R1,R2) (F2,F3,R1,R3) (F2,F3,R2,R3)	25	7
(อ่อน : แข็ง, 3 : 1)	(F1,F2,F3,R1) (F1,F2,F3,R2) (F1,F2,F3,R3)	25	-
(แข็ง : แข็ง, 1 : 1)	(R1,R2) (R1,R3) (R2,R3)	50	3
(แข็ง : แข็ง : แข็ง, 1 : 1 : 1)	(R1,R2,R3)	33.33	1
รวมเหลือทั้งหมด			<u>20</u>

จากตารางที่ 4.13 สูตรที่มีการกากบาทเป็นสูตรที่ถูกตัดทิ้ง เนื่องจากโพลีเมอร์ที่ได้มีลักษณะที่ไม่ดี เช่น อ่อนนุ่ม หดตัว เซลล์หยาบ หรือความหนาแน่นสูงเกินไป เป็นต้น ส่วนสูตรที่เหลือเป็นสูตรที่สมควรทำการปรับปรุงเพิ่มเติม และมีแนวโน้มที่จะเป็นสูตรสำหรับโพลีเอทิลีนเทินที่ใช้เป็นโครงสร้างหลักของกระดานโต้คลื่นตามที่ผู้ประกอบการต้องการ อย่างไรก็ตามจะมีการสุ่มเอาสูตรที่ได้คัดเลือกแล้วบางสูตรไปทำการปรับปรุงทั้งองค์ประกอบและภาวะการเตรียมซึ่งผลที่ได้จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.10

4.10 ผลการปรับปรุงสูตรและภาวะการเตรียมโพลีเอทิลีนเทิน

จากการคัดเลือกสูตรโพลีเอทิลีนเทินจากสูตรในข้อ 4.9 บางสูตรมาทำการปรับปรุงอย่างอิสระทั้งในด้านองค์ประกอบ และด้านภาวะการเตรียมโพลีเอทิลีนเทิน ได้ผลดังต่อไปนี้

4.10.1 การปรับเปลี่ยนสูตรองค์ประกอบ

- ปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมีต่าง ๆ

เมื่อเลือกสูตรที่จะทำการปรับมาแล้ว จึงเริ่มปรับโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของพอลิออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยา สารฟู และสารลดแรงตึงผิว พบว่ายังไม่มีสูตรใดที่ให้ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมและลักษณะของชิ้นงานตรงตามความต้องการ เพียงแต่มีบางสูตรที่ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะดีขึ้น อย่างไรก็ตามในทุกสูตรยังมีรูพรุนเกิดขึ้น คาดว่าเกิดจากการบั่นผสมที่ขาดประสิทธิภาพหรือใช้เวลาในการบั่นผสมน้อยเกินไป ทั้งนี้เวลาในการบั่นผสมมีจำกัด เนื่องจากโพลีเมอร์เริ่มฟูตัวเร็ว

จากนั้นจึงได้ปรับสูตรโดยการลดปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาลงโดยหวังว่าการฟูตัวของโพลีเอทิลีนเทินจะช้าลงทำให้มีเวลาในการบั่นผสมได้นานขึ้น แต่ปรากฏว่าการลดปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาลงนั้นทำให้เวลาในการฟูตัวของโพลีเอทิลีนเทินลดลงได้ไม่มากนัก กลับไปทำให้ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนเทินสูงขึ้นมาก ซึ่งขัดกับความต้องการของผู้ประกอบการที่ต้องการโพลีเอทิลีนเทินที่มีความหนาแน่นต่ำหรือน้ำหนักเบา

- การเติมสารสี

เนื่องจากผลของโพลีเอทิลีนเทินในทุกสูตรที่ได้มีการเตรียมแล้วข้างต้น พบว่าได้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีสีค่อนข้างเหลือง (pale-yellow) ซึ่งขัดกับความต้องการของผู้ประกอบการที่ต้องการให้ชิ้นงานมีสีขาว (white) ดังนั้นจึงทำการเติมสารสีขาว คือไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ลงไป ซึ่งปรากฏว่าชิ้นงานมีสีขาวขึ้นแต่ยังไม่ขาวเท่ากับโพลีเอทิลีนเทินแบบ ทั้งนี้เนื่องจากสารตั้งต้นที่จัดหาได้ในขณะนี้โดยเฉพาะ

โทลูอินไดไอโซไซยาเนตพรีพอลิเมอร์ (BX 9201) ที่เป็นองค์ประกอบหลักมีสีเหลืองมาก (อาจเป็นเพราะใกล้เสื่อมสภาพ) ดังนั้นจึงต้องมีการสั่งซื้อ BX 9201 มาใหม่ซึ่งคาดว่าสารดังกล่าวจะมีสีขาวกว่าที่มีอยู่ แต่เท่าที่ทราบบริษัทผู้ผลิตได้ยกเลิกการผลิต BX 9201 นานแล้ว จึงต้องขอความอนุเคราะห์ให้ผลิตเป็นกรณีพิเศษภายหลัง

4.10.2 การปรับภาวะการทดลอง

- การลดอุณหภูมิของสารตั้งต้น

การลดอุณหภูมิของสารตั้งต้นลงมาที่ประมาณ 14-16 องศาเซลเซียส พบว่าทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟมช้าลง แต่ยังไม่เพียงพอกับเวลาที่ผู้ประกอบการต้องการและไม่เพียงพอกับเวลาในการกวนที่ทำให้องค์ประกอบเข้ากันได้ดี และเมื่อมีการลดอุณหภูมิของสารตั้งต้นลงมาที่ประมาณ 6-8 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกับที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ปัจจุบัน พบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟมในบางสูตรค่อนข้างใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบ (แม้ว่ายังไม่เท่ากันที่เดียนักก็ตามโดยเฉพาะเวลาส่วนของ cream time ที่ยังน้อยเกินไป) อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงดังกล่าวนั้นทำให้การปั่นผสมให้เข้ากันนั้นกระทำได้ยากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารตั้งต้นมีความหนืดสูงมากส่งผลให้การทำงาน (handle) เช่น การเทสาร และการปั่นผสมกระทำได้ยากลำบากขึ้น

- การเพิ่มเวลาในการปั่นผสม

การเพิ่มเวลาในการปั่นผสม มีผลทำให้ชิ้นงานโฟมที่ได้มีลักษณะของเซลล์โฟมที่ละเอียดและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่การเพิ่มเวลาในการปั่นผสมต้องขึ้นกับอุณหภูมิของสารตั้งต้นที่นำมาทำปฏิกิริยาที่กล่าวแล้วข้างต้น ในกรณีที่มีการปั่นผสมได้ไม่ดีขึ้นว่าเซลล์โฟมที่ได้มีลักษณะหยาบและใหญ่ ทั้งยังมีคราบของสารตั้งต้นเหลือติดบริเวณผิวของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้มีความเปราะ และมีการหลุดร่วงของเศษโฟมจำนวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.11 ระบุสูตรและภาวะการเตรียมที่เหมาะสม

จากผลการทดลองที่ได้โดยเฉพาะจากการปรับสูตรในข้อ 4.10 สามารถสรุปสูตรโฟมและภาวะการเตรียมที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในขนาดใหญ่ขึ้นในแม่แบบปิดที่จัดเตรียมไว้ และใช้เตรียมชิ้นงานในระดับปฏิบัติการจริง ณ โรงงานผู้ประกอบการซึ่งสูตรที่ได้มีองค์ประกอบและภาวะการเตรียมดังตารางที่ 4.14 และ 4.15

ตารางที่ 4.14 สูตรสูตรโฟมและภาวะการเตรียมที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในระดับที่ใหญ่ขึ้น และในระดับปฏิบัติการจริง

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	ReA 8770	3
Polyol	RP 3003	7
Polyol	RP 4260	55
Polyol	RP 4010	35
Blowing agent (Distilled water)	-	5.5
Catalyst	33-LV	0.3
Surfactant	B 8444	3
TiO ₂		2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	234.3 (ตามคำนวณ)
Stirring speed = 2,000 rpm (or higher)		
Stirring time = 25-30 second		
Storage temperature of reactants = 6-8 degree C		

หมายเหตุ

- Stirring time = 25-30 วินาที (เพิ่มจากการออกแบบการทดลองซึ่งทำที่ 8-10 วินาที)
- Storage temperature of reactants = 6-8 °C (ลดลงจากแผนการทดลองซึ่งทำที่ 30-32 °C)

ตารางที่ 4.15 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของสูตรโฟมที่เหมาะสม

cream time (ct) (วินาที)	gel time (gt) (วินาที)	tact free time (tft) (วินาที)
40-50	140-150 (2.20-2.30 นาที)	240-250 (4.00-4.10 นาที)

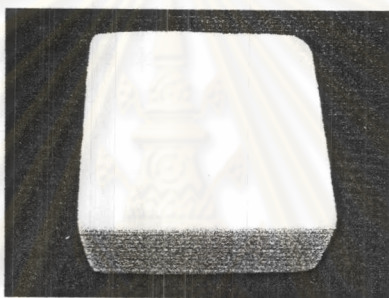
จากตารางที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า เวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสูตรโฟมที่เหมาะสม โดยเฉพาะค่า cream time ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญในการขึ้นรูปโฟม มีความไวกว่าโฟมต้นแบบอยู่พอสมควร (โฟมต้นแบบมีค่า cream time ประมาณ 100-110 วินาที) ซึ่งในจุดนี้อาจส่งผลกับขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ในส่วนของการบินผสมสารตั้งต้นให้เข้ากัน และการเทลงในแม่แบบได้ทันเวลา

4.12 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสม

เป็นผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ได้จากสูตรที่เหมาะสม (ในตารางที่ 4.14) ที่จะใช้ในการเตรียมชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในแม่แบบปิดที่เตรียมขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ และเตรียมชิ้นงานในระดับปฏิบัติการจริง ณ โรงงานผู้ประกอบการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.12.1 การศึกษาลักษณะปรากฏ

จากการศึกษาลักษณะที่ปรากฏภายนอกของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากสูตรที่เหมาะสมในขณะนี้ด้วยสายตาได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากสูตรที่เหมาะสม

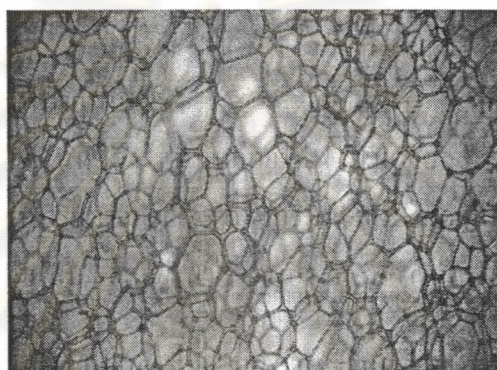
จากรูปที่ 4.16 เห็นได้ว่าโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากสูตรที่เหมาะสมในขณะนี้ มีลักษณะภายนอกที่ใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบ กล่าวคือชิ้นงานไม่หดรัด มีเซลล์โฟมที่เล็ก และละเอียดดี แต่ยังมีปัญหาในเรื่องชิ้นงานมีรูพรุนบางส่วน และสีไม่ขาวเท่าที่ควร (มีสีขาวนวล) ซึ่งรูพรุนที่พบอาจเกิดจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการป่นผสม ส่วนสีของชิ้นงานที่ยังมีสีขาวนวลนั้นมาจากสารตั้งต้นที่ใช้มีสีเหลืองดังที่กล่าวแล้วในข้อ 4.10.1

4.12.2 การหาค่าความหนาแน่น

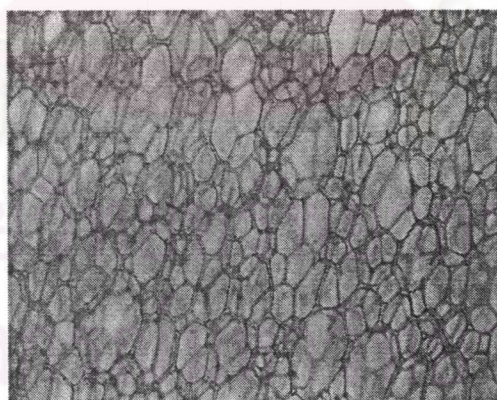
จากการหาค่าความหนาแน่นของโฟมที่ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระ (free rise density) พบว่า โฟมตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นประมาณ 32-35 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบ และอยู่ในช่วงที่ผู้ประกอบการต้องการ

4.12.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์

จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากสูตรที่เหมาะสมในขณะนี้ (สูตรในตารางที่ 4.14) เปรียบเทียบกับโฟมต้นแบบที่เตรียมในภาวะเดียวกันได้ผลดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานตัวอย่างจากสูตรที่เหมาะสม

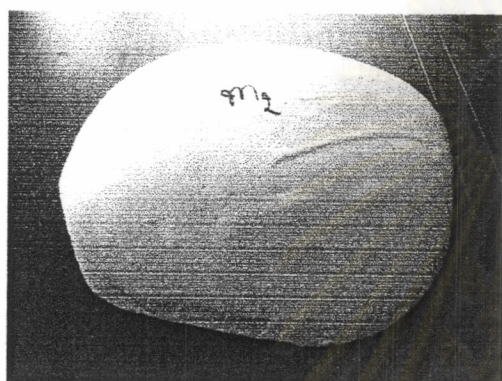


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าภาพถ่ายที่ออกมายังไม่ชัดเจนเท่าที่ควร เนื่องจากความสามารถของกล้องจุลทรรศน์และการเตรียมชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามจากรูปทำให้ทราบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ในขณะนี้ มีลักษณะเซลล์ส่วนใหญ่ที่เป็นแบบเซลล์ปิด และขนาดของเซลล์ก็มีความใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบ (โดยดูจากสายตา) เป็นต้น

4.13 ผลการเตรียมชิ้นงานโพลีเอทิลีนจากสูตรที่เหมาะสมในแม่แบบปิดที่จัดเตรียมขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองเตรียมโพลีเอทิลีนในแม่แบบปิดโดยใช้สูตรที่เหมาะสม (ในข้อ 4.11) เพื่อเป็นการจำลองระบบการเตรียมโพลีเอทิลีนในระดับห้องปฏิบัติการให้ใกล้เคียงกับระบบจริงในโรงงานผู้ผลิตได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19



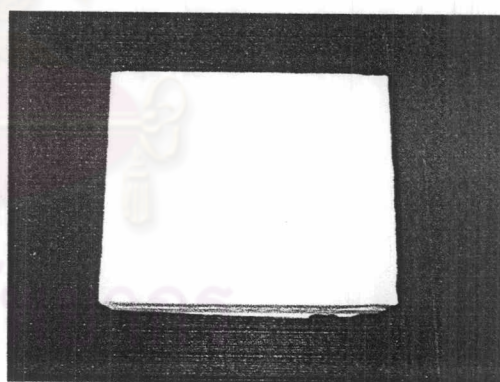
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

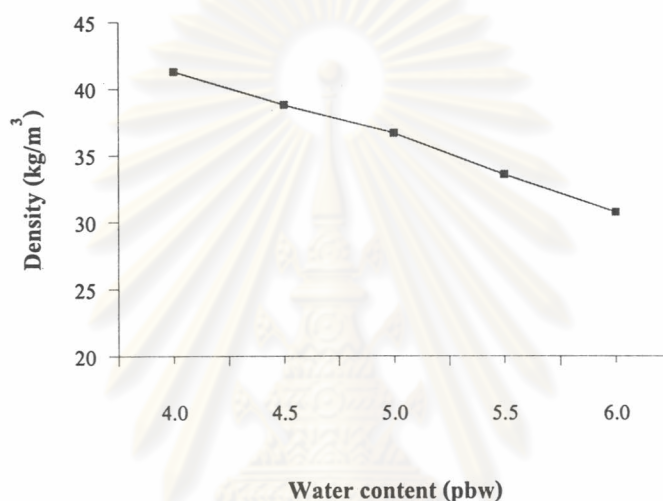
รูปที่ 4.19 ชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่เตรียมในแม่แบบปิด

- ก. ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้น้อยเกินไป
- ข. การบั่นผสมที่ยังไม่เข้ากันของสารตั้งต้น
- ค. ชิ้นงานยังไม่เต็มแม่แบบ
- ง. ชิ้นงานที่ค่อนข้างสมบูรณ์

4.14 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิด (open mold)

4.14.1 การหาค่าความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทนที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) โดยเตรียมชิ้นงานในแม่แบบเปิด (ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระ) ได้ผลดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิด (ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระ) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้

จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทนลดลงจาก 41.3 ถึง 30.75 ก.ก./ลบ.ม. เมื่อปริมาณของน้ำกลั่นเพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 6.0 ส่วนโดยน้ำหนัก (pbw) (ต่อพอลิออลทั้งหมด 100 pbw) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี และสามารถอธิบายได้ดังนี้

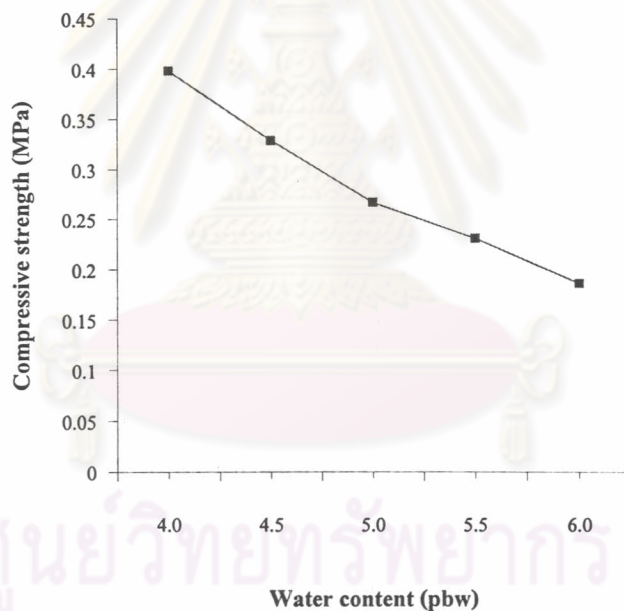
จากงานวิจัยของ W.J. Seo และคณะ [22] ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำกลั่น (สารฟู) ที่ใช้ จะพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจะลดลง เนื่องจากเซลล์ของโฟมพอลิยูรีเทนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ปกติสารฟูทางเคมี เช่น น้ำกลั่น จะทำปฏิกิริยาเคมีกับไดไอโซไซยานตเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารตั้งต้น และความเข้มข้นของก๊าซ (blowing gas) ในของผสมที่มากเกินไปจนเกินขีดในการละลาย (solubility limit) ทำให้ฟองก๊าซ (bubble) เริ่มเกิดขึ้น และในระหว่าง

การฟูตัว (rise time) ฟองอากาศที่เกิดขึ้นแล้วจะขยายขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังมีฟองอากาศใหม่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งถ้าปริมาณน้ำกลั่นเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก และฟองอากาศที่มากขึ้นนี้จะเกิดการรวมตัวกับฟองอากาศอื่น มีผลทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ หรือเซลล์โฟมที่ใหญ่ขึ้นนั่นเอง [17, 22]

4.15 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิด

4.15.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด

จากการทดสอบความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิดที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิดกับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้

จากรูปที่ 4.21 แสดงความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนกับปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ พบว่าเมื่อปริมาณน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนาแน่นที่ลดลง (จากผลข้อ 4.14) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าสมบัติเชิงกลของโฟม (cellular materials) จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเป็นหลัก

จาก simple power law สามารถใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกล (mechanical properties) เช่น ความทนแรง (strength) หรือ โมดูลัส (modulus) กับความหนาแน่น (density) ได้ดังสมการที่ 4.1 ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่า P หรือสมบัติเชิงกลนั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ D หรือความหนาแน่น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสมบัติเชิงกลของโฟมจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นนั่นเอง [1, 5, 17]

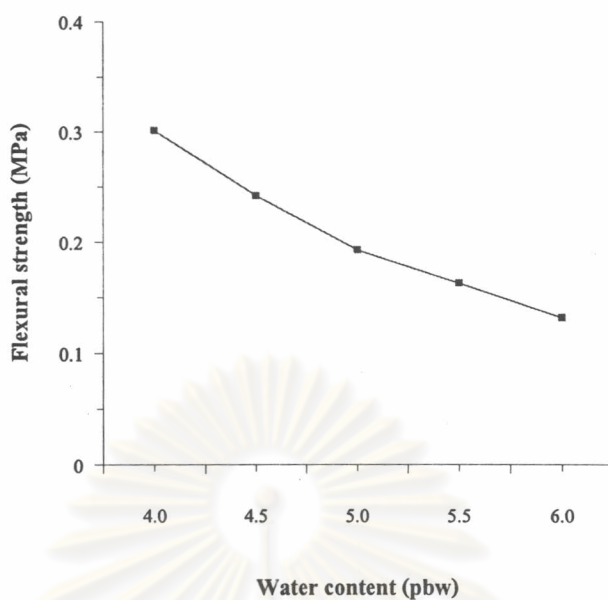
$$P = AD^n \quad (\text{or } \log P = \log A + n \log D) \quad (4.1)$$

เมื่อ	P	คือสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรง หรือ โมดูลัส
	D	คือความหนาแน่น
	A	คือค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและสมบัติทางกายภาพของเรซิน (resin)
	n	คือค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนรูปเชิงกล (deformation mechanic) ของโฟม (ปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 1-2)

4.15.2 การทดสอบความต้านทานแรงคัดโค้ง

จากการทดสอบความต้านทานแรงคัดโค้งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิดที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟูได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.22

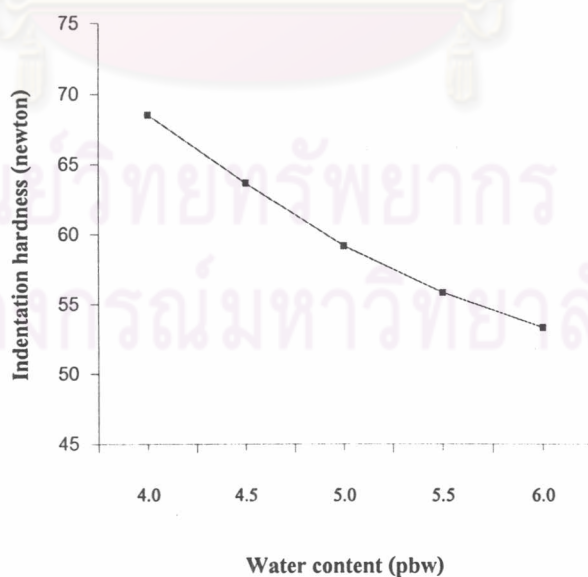
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทน ที่เตรียมในแม่แบบเปิดกับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้

4.15.3 การทดสอบความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิดที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟูได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิดกับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงความต้านทานแรงคัดโค้ง และความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนกับปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานแรงคัดโค้ง และความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนลดลง ซึ่งผลที่ได้นี้มีลักษณะเดียวกันกับความต้านทานแรงกดคดงที่ได้อธิบายแล้วข้างต้น (ในข้อ 4.15.1)

4.16 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด (closed-mold)

4.16.1 การหาค่าความหนาแน่น

จากการหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่ทำการแปรผันสารฟูที่เตรียมในแม่แบบปิด ได้ผลดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิดจากการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น)

ปริมาณสารฟู : น้ำกลั่น (pbw)	ความหนาแน่น (ก.ก./ลบ.ม.)
4.0	45.68-46.08
4.5	44.26-44.86
5.0	42.78-43.64
5.5	43.87-44.51
6.0	45.09-46.11

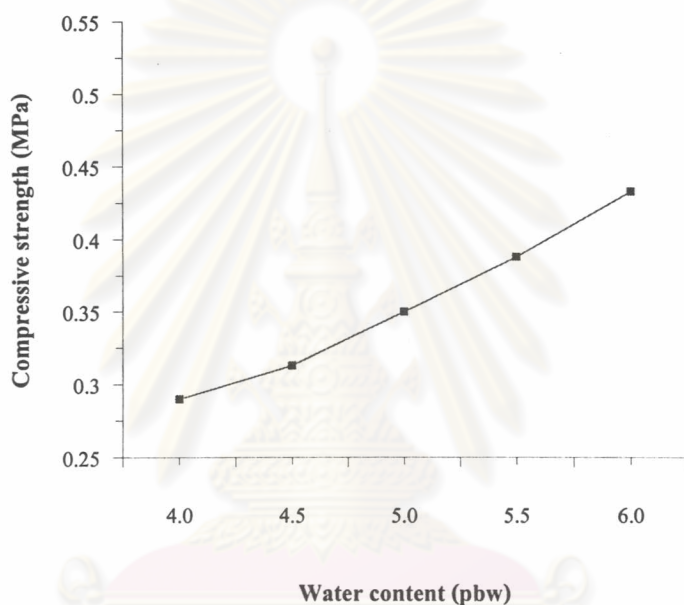
(ความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานที่เตรียมในแม่แบบปิดข้างต้นอยู่ที่ประมาณ 44.7 ก.ก./ลบ.ม.)

จากการเตรียมชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนในแม่แบบปิดซึ่งทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ดังที่กล่าวแล้วนั้น พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเตรียมชิ้นงานในระบบที่ปิด ทำให้การฟูตัวของโฟมมีขีดจำกัดอยู่ในบริเวณหนึ่ง ๆ เท่านั้น

4.17 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด

4.17.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด

จากการทดสอบความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่เตรียมในแม่แบบปิด [ความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกัน (เฉลี่ย 44.7 ก.ก./ลบ.ม.)] ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.24



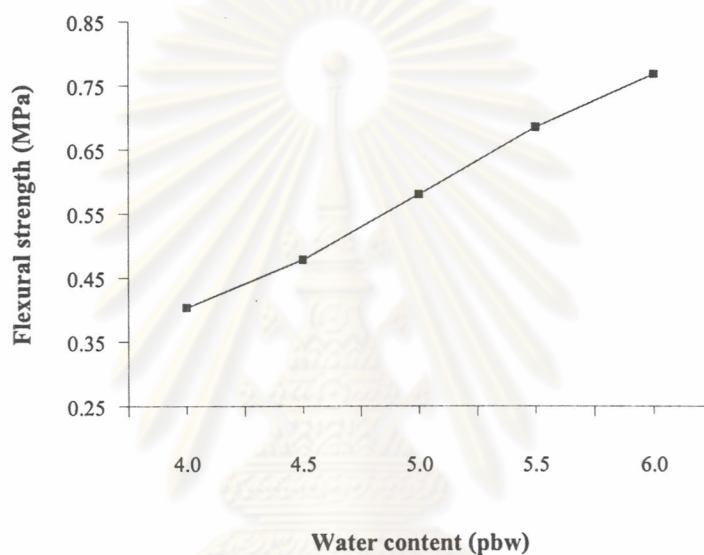
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด (ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้

ในรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน (เฉลี่ย 44.7 ก.ก./ลบ.ม.) กับปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ พบว่าความต้านทานแรงกดของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้นซึ่งต่างจากการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนในแม่แบบเปิดดังรูปที่ 4.21 ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำกลั่นมีส่วนในการทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแห (crosslink structure) ของพอลิยูเรีย (polyurea) และไบยูเรต (biuret) ในโฟมพอลิยูรีเทนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกลั่นกับไอโซไซยานต (ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2) และอีกประการหนึ่งการเพิ่มปริมาณของน้ำกลั่นทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณของไอโซไซยานต (TDI prepolymer) เพื่อให้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ณ จุดนี้จึงเป็นการเพิ่มปริมาณสายโซ่ที่แข็ง (hard segment content) ของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนขึ้นอีก ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ที่การเพิ่มขึ้นของความต้านทาน

แรงกดของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันนี้อาจเนื่องมาจากการที่โฟมพอลิยูรีเทนดังกล่าวมีโครงสร้างที่แข็งแรง และมีปริมาณสายโซ่ที่แข็ง เพิ่มมากขึ้น [17, 22]

4.17.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

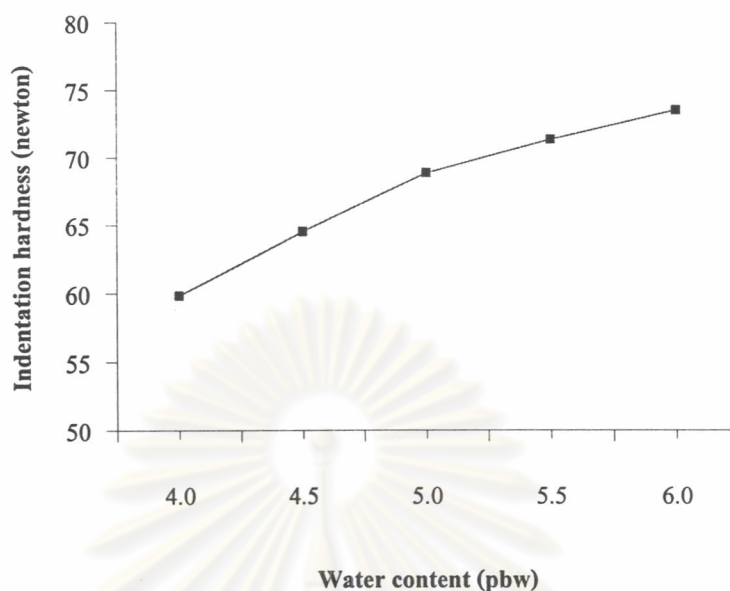
จากการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟูที่เตรียมในแม่แบบปิด (ความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกัน) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด (ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้

4.17.3 การทดสอบความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟูที่เตรียมในแม่แบบปิด (ความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกัน) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด (ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดโค้ง และความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ตามลำดับ กับปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ พบว่าความต้านทานแรงดัดโค้ง และความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้น โดยเหตุผลสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับข้อ 4.17.1 ข้างต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.18 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรที่เหมาะสมกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ

เป็นการสรุปสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งในสูตรที่เหมาะสม (ข้อ 4.11) ที่เตรียมขึ้นงานในแม่แบบปิดในระดับห้องปฏิบัติการ (ข้อ 4.13 รูป ง) เปรียบเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบที่เตรียมในลักษณะเดียวกัน โดยใช้สารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อเป็นการสรุปผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการก่อนนำสูตรโฟมพอลิยูรีเทนที่เหมาะสมไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์กระดาน ไม้ค้ำในระดับปฏิบัติการจริงที่โรงงานผู้ประกอบการต่อไป ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ แสดงได้ดังในตารางที่ 4.17 และ 4.18

ตารางที่ 4.17 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลบางประการของโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบและโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมที่เตรียมในแม่แบบปิดในระดับห้องปฏิบัติการ

คุณสมบัติ		หน่วย	โฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ	โฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสม
สมบัติทางกายภาพ	ความหนาแน่น (Density)	kg/m ³	40-45	43-45
สมบัติเชิงกล	ความต้านทานแรงกด (Compressive strength)	MPa	0.19	0.39
	ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength)	MPa	0.65	0.69
	ความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย (ความแข็ง) (Indentation hardness)	newton	60.33	71.33

ตารางที่ 4.18 สถิติสภาพทางรูปร่างที่ภาวะต่าง ๆ ของโพลีเอทิลีนเทนนีแบบและโพลีเอทิลีนจากสูตรที่เหมาะสมที่เตรียมในแม่แบบปิดในระดับห้องปฏิบัติการ

ภาวะ (condition)	เวลา (Period)	ด้าน	% การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	
			โพลีเอทิลีนเทนนีแบบ	โพลีเอทิลีนจากสูตร ที่เหมาะสม
At dry condition -20 degree C	20 hr.	l	-0.199	-0.086
		w	-0.165	0.000
		h	-0.320	-0.325
	48 hr.	l	-0.083	-0.169
		w	-0.281	0.000
		h	-0.582	-0.682
	7 days	l	-0.199	-0.202
		w	-0.347	-0.036
		h	-0.713	-0.910
	28 days	l	-0.149	-0.351
		w	-0.397	-0.086
		h	-0.811	-1.072
At dry condition 30 degree C	20 hr.	l	-0.483	-0.191
		w	-0.115	0.000
		h	0.596	0.000
	48 hr.	l	-0.351	-2.984
		w	-0.132	-0.047
		h	0.563	0.100
	7 days	l	-0.698	-3.097
		w	-0.198	-0.113
		h	0.199	0.227
	28 days	l	-1.079	-3.194
		w	-0.148	-0.213
		h	-0.794	0.227

ภาวะ (condition)	เวลา (Period)	ด้าน	% การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	
			โพลีเมอร์ที่ทนต่อน้ำ	โพลีเมอร์ที่ทนจากสูตร ที่เหมาะสม
At dry condition 80 degree C	20 hr.	l	-0.964	-0.472
		w	-0.430	-0.331
		h	-0.100	-0.468
	48 hr.	l	-0.864	-0.472
		w	-0.629	-0.364
		h	-0.233	-0.402
	7 days	l	-2.144	-0.571
		w	-0.960	-0.761
		h	-2.700	-0.633
	28 days	l	-7.345	-0.882
		w	-3.972	-1.043
		h	-12.467	-0.831
At 100 % R.H. 60 degree C	20 hr.	l	-9.163	0.898
		w	-7.699	1.162
		h	-6.752	1.339
	48 hr.	l	-14.149	0.782
		w	-13.133	1.046
		h	-16.173	1.208
	7 days	l	-30.398	-2.994
		w	-34.106	-2.859
		h	-31.159	-2.710
	28 days	l	-32.783	-4.391
		w	-37.211	-3.372
		h	-39.526	-3.363

หมายเหตุ

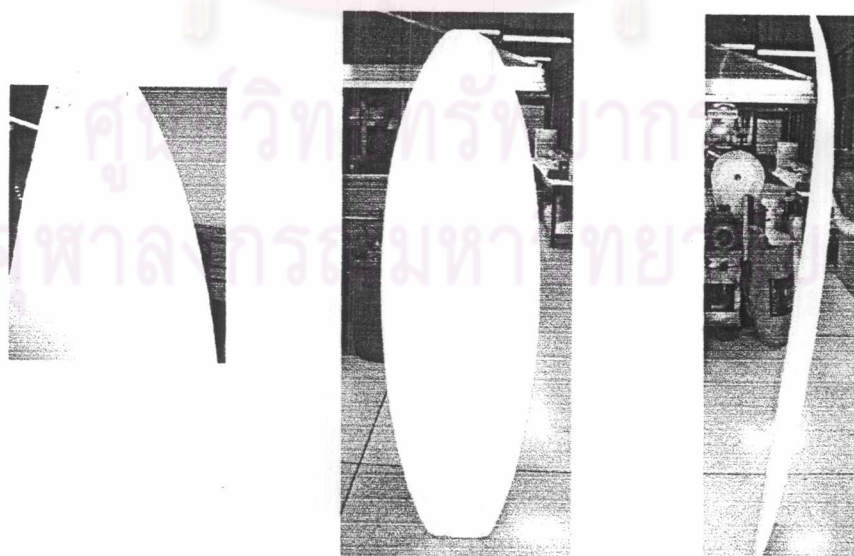
l = ด้านยาว, w = ด้านกว้าง และ h ด้านสูง (หนา)

จากตารางที่ 4.16 เห็นได้ว่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลบางประการของโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมที่เตรียมขึ้นจากสารเคมีที่จัดหาจากภายในประเทศมีความใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลที่มีค่าที่ดีกว่า

และจากตารางที่ 4.17 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ และ โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ โฟมทั้ง 2 ชนิดมีการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น (แต่ในปริมาณที่ต่างกัน) ยกเว้นที่ภาวะ 60 องศาเซลเซียส 100 % R.H. โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากสูตรที่เหมาะสมจะขยายขนาดเล็กน้อยในช่วงระยะเวลาแรก ๆ และค่อย ๆ เกิดการหดตัวลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดเริ่มต้น ในขณะที่ภาวะเดียวกันนี้ โฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบเกิดการหดตัวค่อนข้างมาก เช่น เกิดการหดตัวถึงประมาณ 30 % เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเสถียรภาพทางรูปร่างของโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมส่วนใหญ่มีค่าที่ดีกว่าโฟมต้นแบบ กล่าวคือ มีร้อยละ (%) การเปลี่ยนรูปร่างที่น้อยกว่า ณ ภาวะต่างๆ โดยเฉพาะที่ภาวะ 60 องศาเซลเซียส 100 % R.H.

4.19 ผลการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในระดับปฏิบัติการจริง

หลังจากทำการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็น โครงสร้างหลักของกระดาน ได้คลีนโดยใช้สารตั้งต้นที่จัดหาได้ภายในประเทศ (สูตรที่เหมาะสมในข้อ 4.11) เครื่องมือ อุปกรณ์ และภาวะการเตรียมในระดับปฏิบัติการจริงที่ส่วนการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน บริษัท คอบรา อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ได้ผลดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็น โครงสร้างหลักของกระดาน ได้คลีนโดยใช้สารตั้งต้นที่ผลิตในประเทศ (สูตรที่เหมาะสมในข้อ 4.11)

4.20 ผลการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโพลียูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง

4.20.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงาน

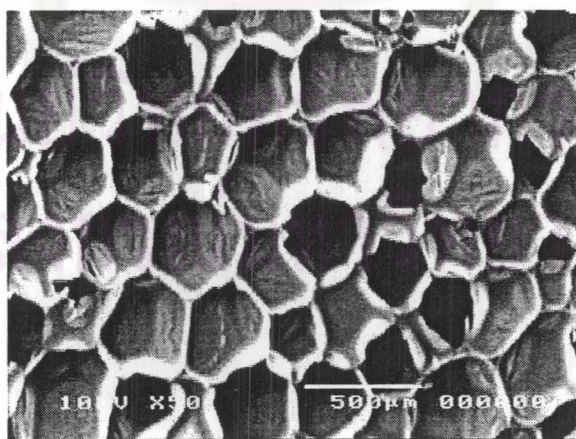
จากการตรวจดูลักษณะภายนอกของชิ้นงานโพลียูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสม (ข้อ 4.19) หลังจากทิ้งชิ้นงานไว้ 5-6 วัน พบว่าโพลีที่ได้มีสีขาวนวล (เนื่องจากสารตั้งต้น (TDI prepolymer : BX 9201 มีสีเหลือง) มีความแข็งไม่หดรัด ไม่มีรูพรุน มีเซลล์ที่ค่อนข้างละเอียดและสม่ำเสมอ

4.20.2 การหาค่าความหนาแน่น

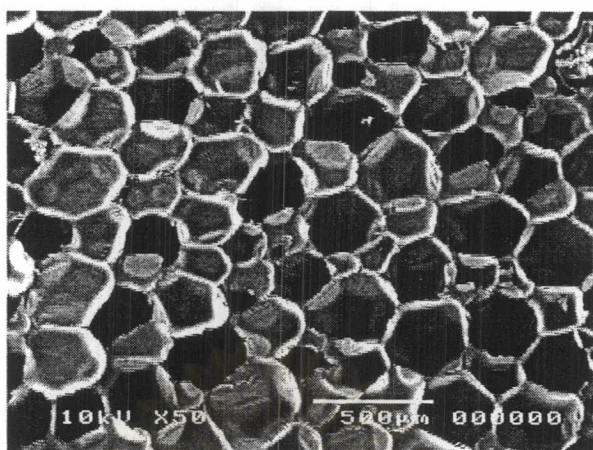
จากการหาค่าความหนาแน่นของโพลียูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสม พบว่ามีค่าความหนาแน่นประมาณ 43-47 ก.ก./ลบ.ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับโพลีเอทิลีน (ความหนาแน่นประมาณ 40-45 ก.ก./ลบ.ม.) แต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่ผู้ประกอบการยอมรับได้

4.20.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างของเซลล์โพลียูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ผลดังรูปที่ 4.28 และ 4.29



รูปที่ 4.28 ภาพถ่าย SEM ของโพลียูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมในทิศทางขนานกับการฟู่ตัว ที่กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของ โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจาก
สูตรที่เหมาะสมในทิศทางตั้งฉากกับการฟุ้งที่กำลังขยาย 50 เท่า

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 พบว่าเซลล์ของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมมีขนาดประมาณ 250-350 ไมโครเมตร (μm) มีลักษณะเป็นเซลล์ปิดเกือบทั้งหมด เซลล์มีลักษณะสม่ำเสมอดี และเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมผลิตภัณฑ์ที่ผู้ประกอบการผลิตได้ในปัจจุบัน (รูปที่ 4.13 และ 4.14) พบว่าเซลล์โฟมมีความสม่ำเสมอและมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ขนาดของเซลล์โฟมโดยรวมจากสูตร โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากสารตั้งต้นภายในประเทศมีขนาดที่ใหญ่กว่าผลิตภัณฑ์ที่ผู้ประกอบการเตรียมได้โดยใช้สารตั้งต้นที่นำเข้าจากต่างประเทศเล็กน้อยซึ่งมีขนาดประมาณ 200-300 ไมโครเมตร

4.21 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสม โดยอาศัยสารตั้งต้นที่จัดหาได้ภายในประเทศได้ผลดังนี้

4.21.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด

จากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมโดยใช้สารตั้งต้นที่จัดหาจากภายในประเทศ

ตัวอย่าง	หมายเลขชิ้นงาน	ความต้านทานแรงกด (เมกะปาสกาล)	มอดุลัสของแรงกด (เมกะปาสกาล)	ภาระรับแรงกดสูงสุดที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 10 % (นิวตัน)
ชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง	1	0.33	6.88	1171
	2	0.32	6.54	1159
	3	0.34	6.79	1237
ค่าเฉลี่ย		0.33	6.74	1189
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.01	0.18	42.00

4.21.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

จากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมโดยใช้สารตั้งต้นที่จัดหาจากภายในประเทศ

ตัวอย่าง	หมายเลขชิ้นงาน	ความต้านทานแรงดัดโค้งสูงสุด (เมกะปาสกาล)	มอดุลัสของแรงดัดโค้ง (เมกะปาสกาล)	ภาระรับแรงดัดโค้งสูงสุด (นิวตัน)
ชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง	1	0.82	12.20	54.36
	2	0.85	12.62	56.84
	3	0.88	13.06	58.36
	4	0.80	12.35	53.41
	5	0.78	11.43	51.69
ค่าเฉลี่ย		0.82	12.33	54.93
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.04	0.60	2.67

4.21.3 การทดสอบความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งหรือความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอยของชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ความแข็งของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมโดยใช้สารตั้งต้นที่จัดหาจากภายในประเทศ

ตัวอย่าง	หมายเลขชิ้นงาน	ความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย (indentation hardness) (นิวตัน)
ชิ้นงาน โพลีเอทิลีน ชนิดแข็ง	1	68.00
	2	66.00
	3	65.00
ค่าเฉลี่ย		66.33
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.53

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย