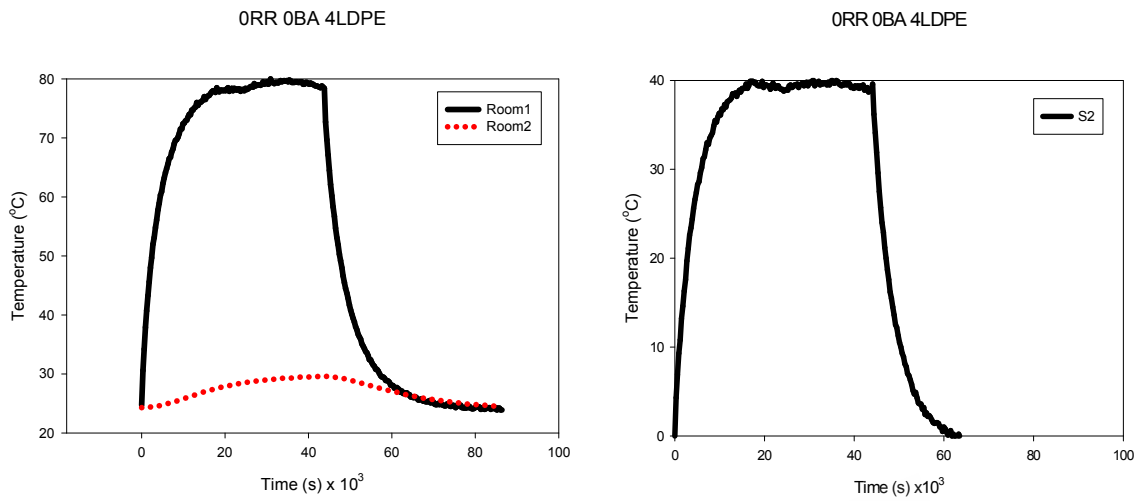
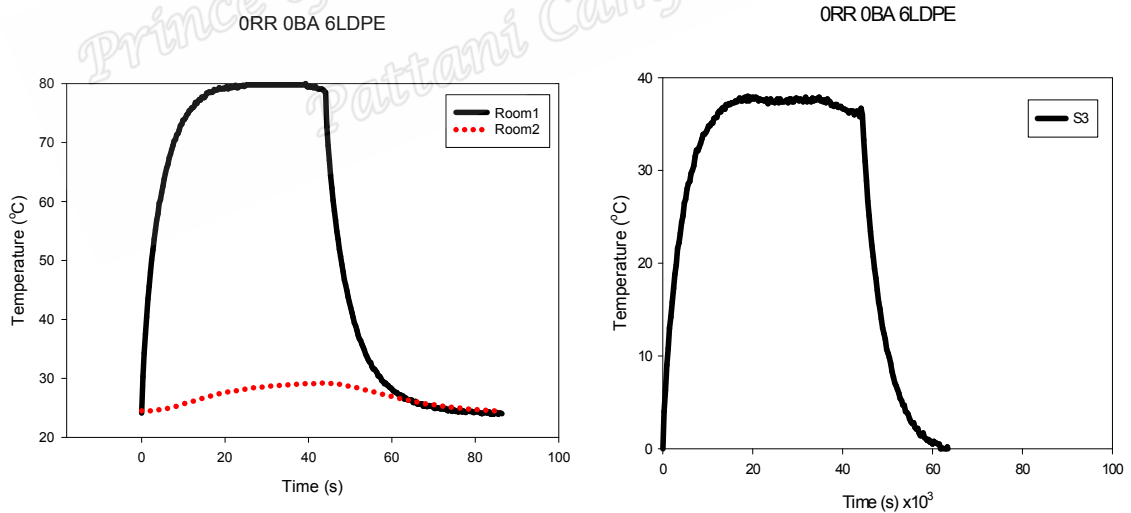


ภาคผนวก ก

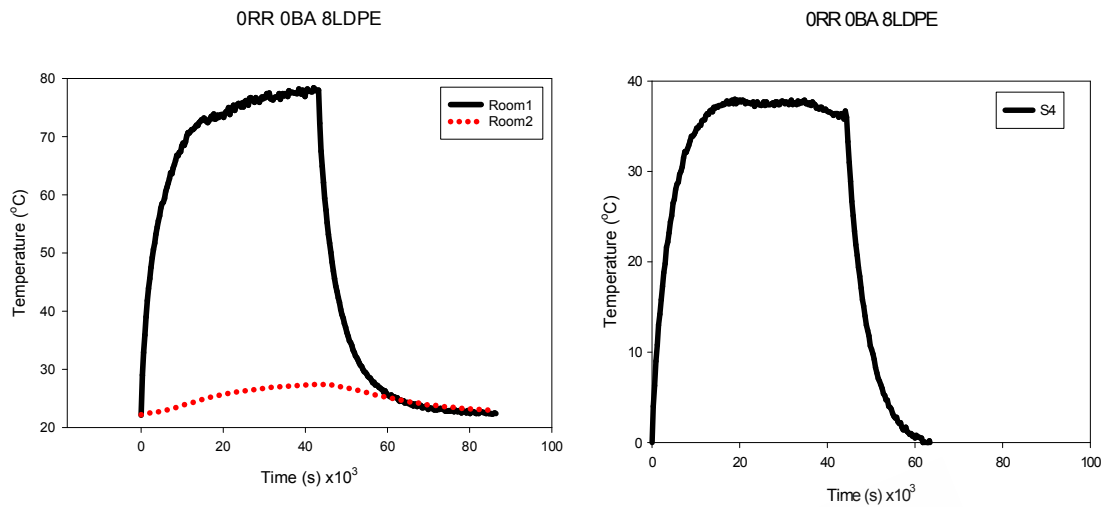
- กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมผัสตัวอย่างกับเวลาของสูตร
ต่าง ๆ



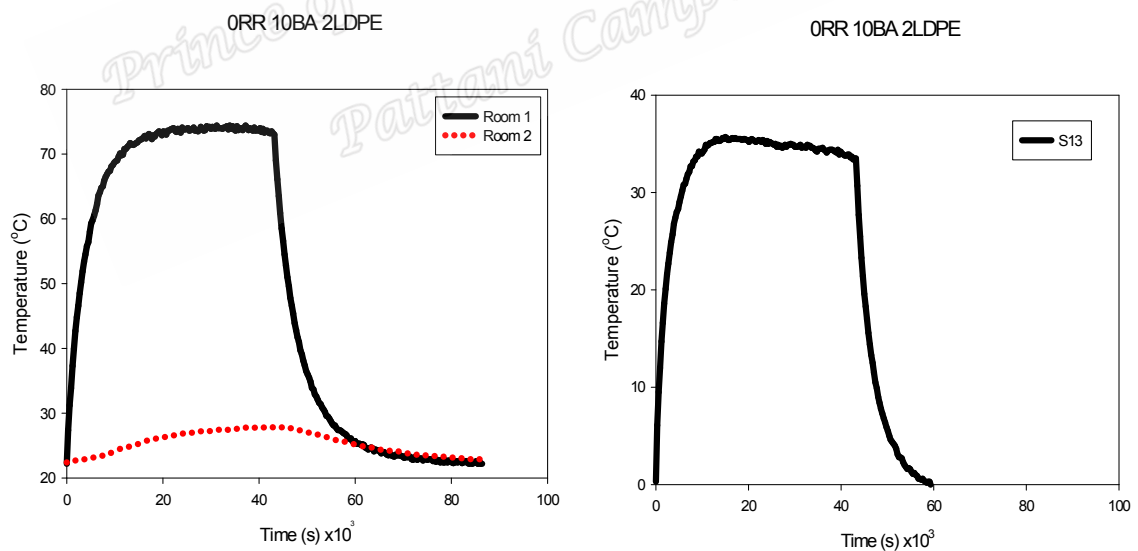
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 4 phr



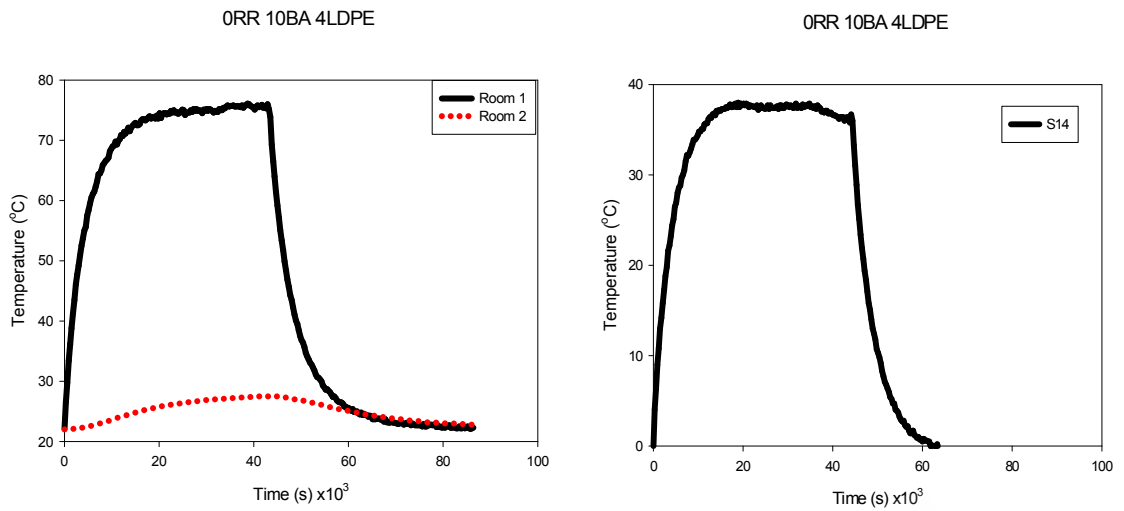
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 6 phr



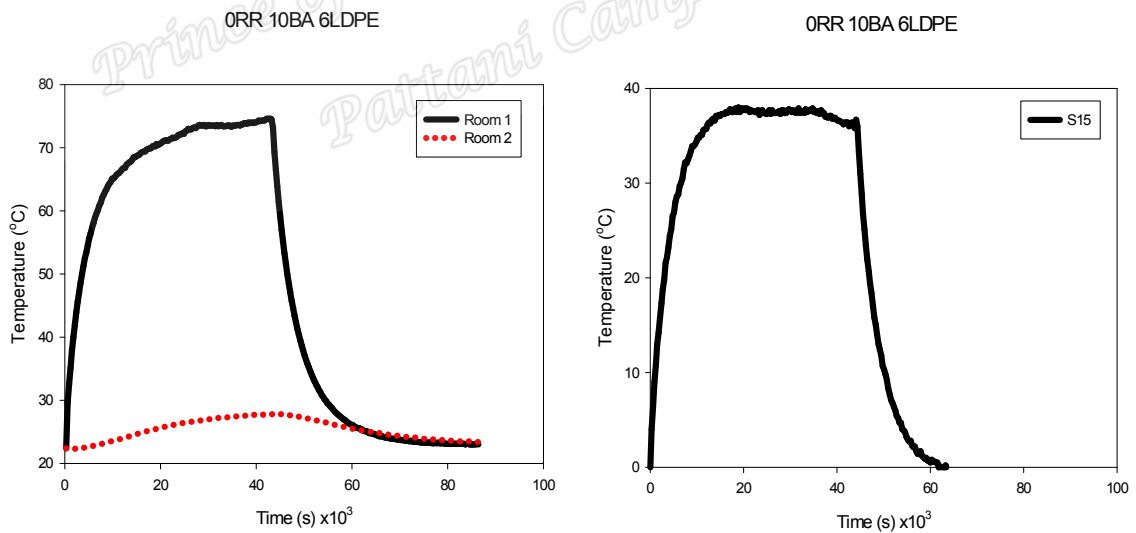
กราฟอุณหภูมิที่ 1 และที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพันธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 8 phr



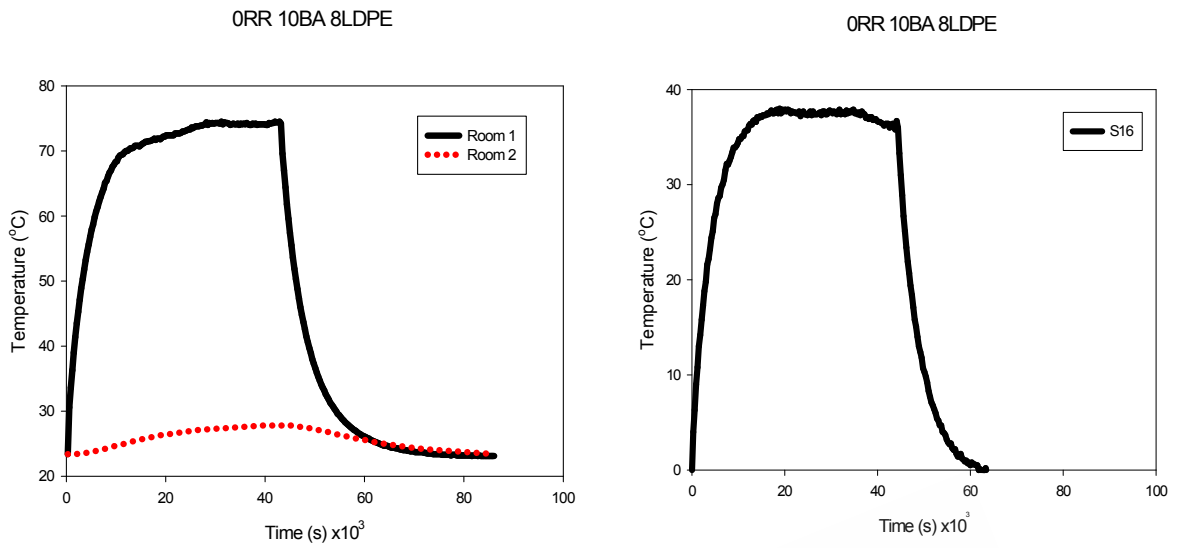
กราฟอุณหภูมิที่ 1 และที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพันธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2 phr



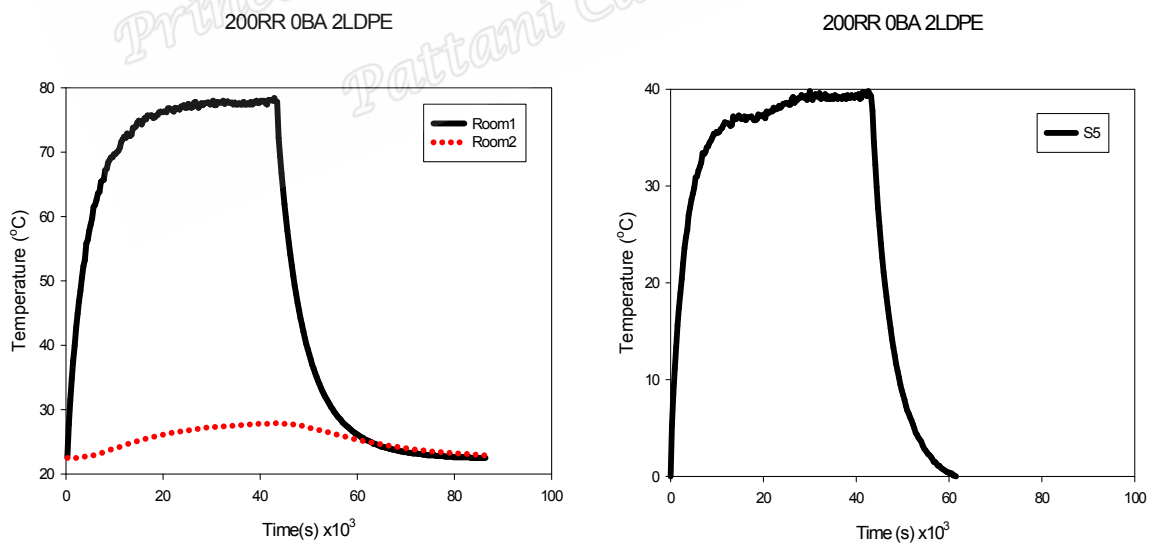
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 4 phr



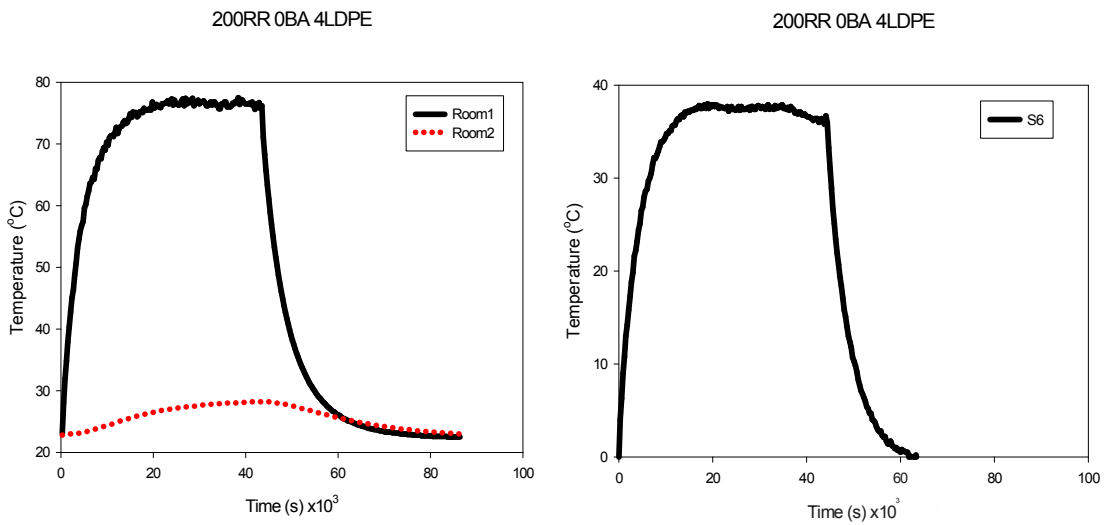
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 6 phr



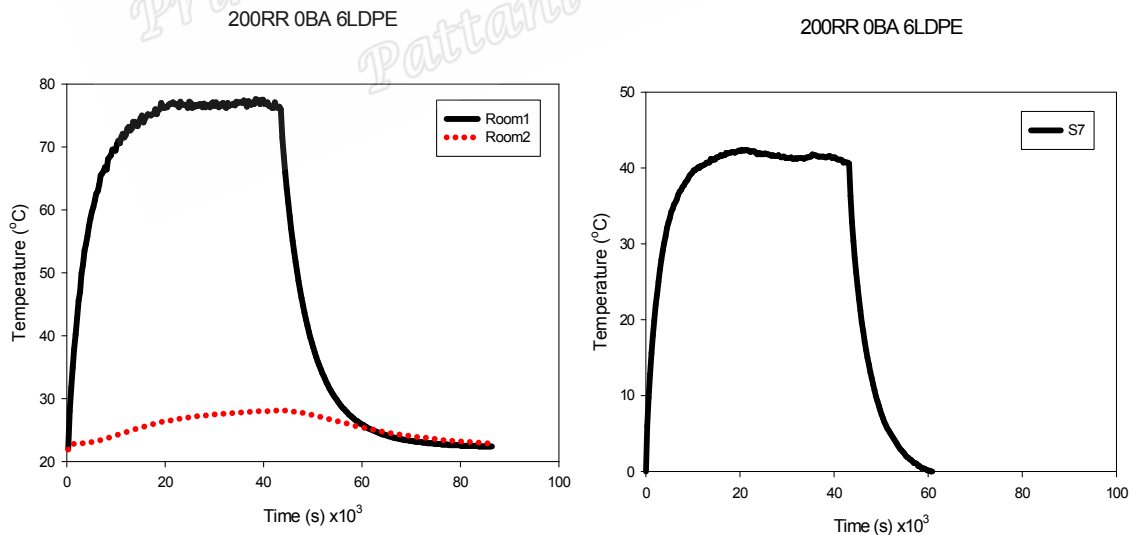
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 8 phr



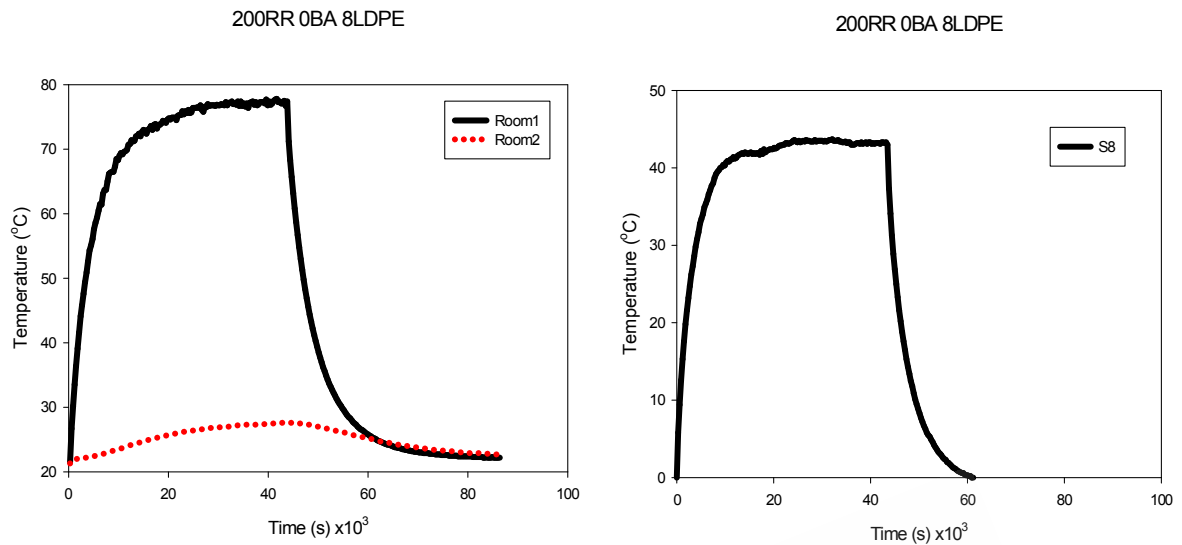
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2 phr



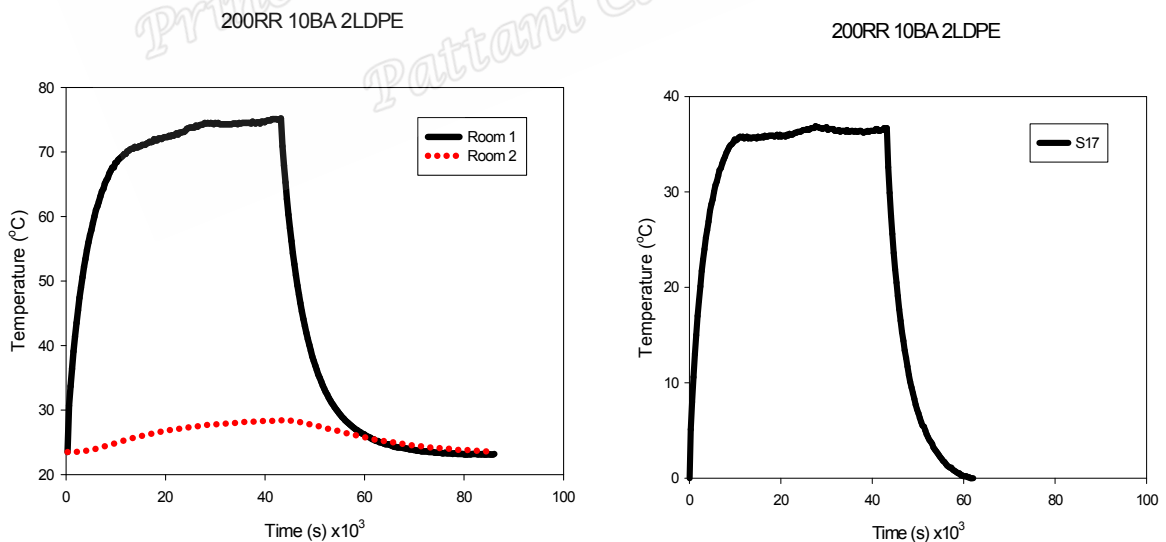
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 4 phr



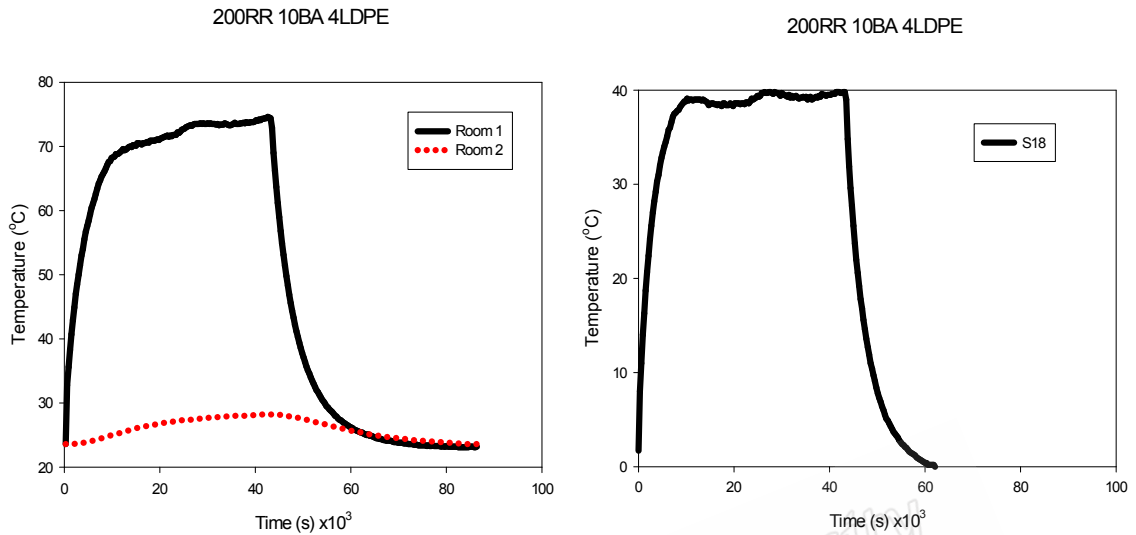
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 6 phr



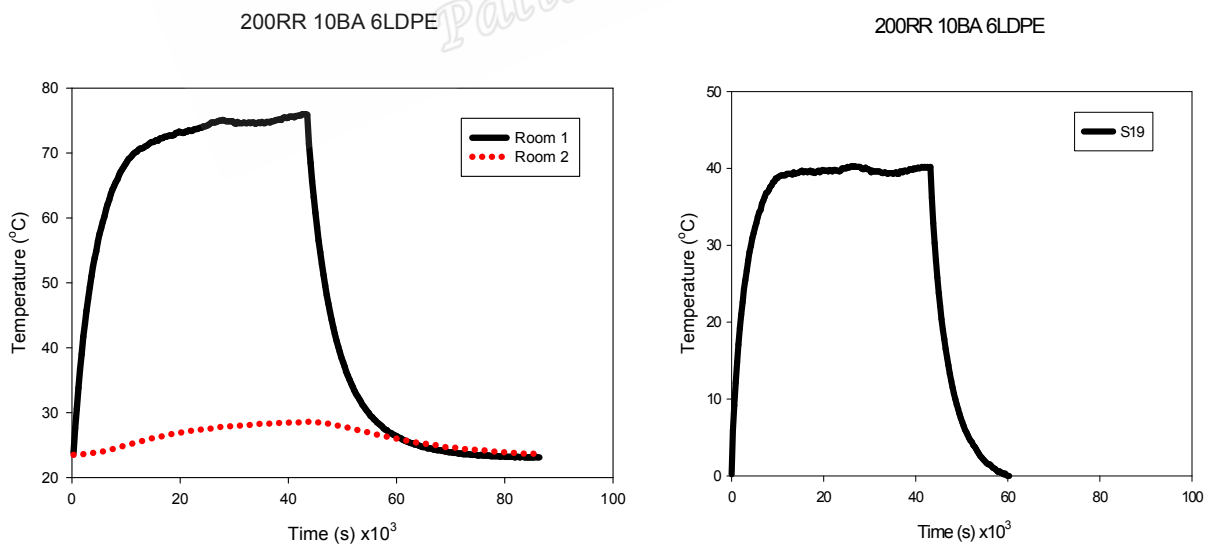
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 8 phr



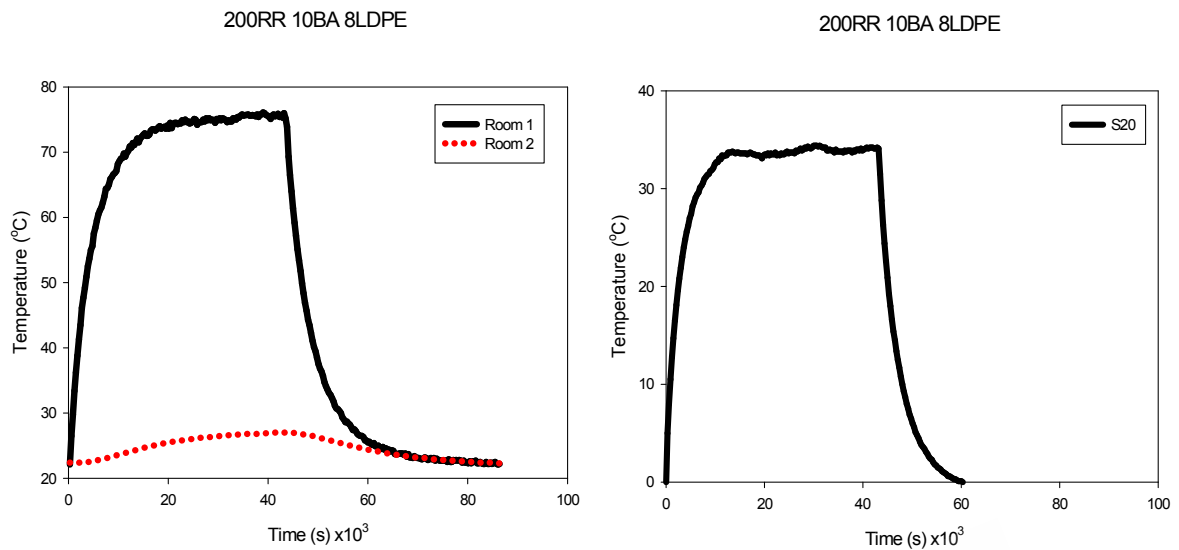
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2 phr



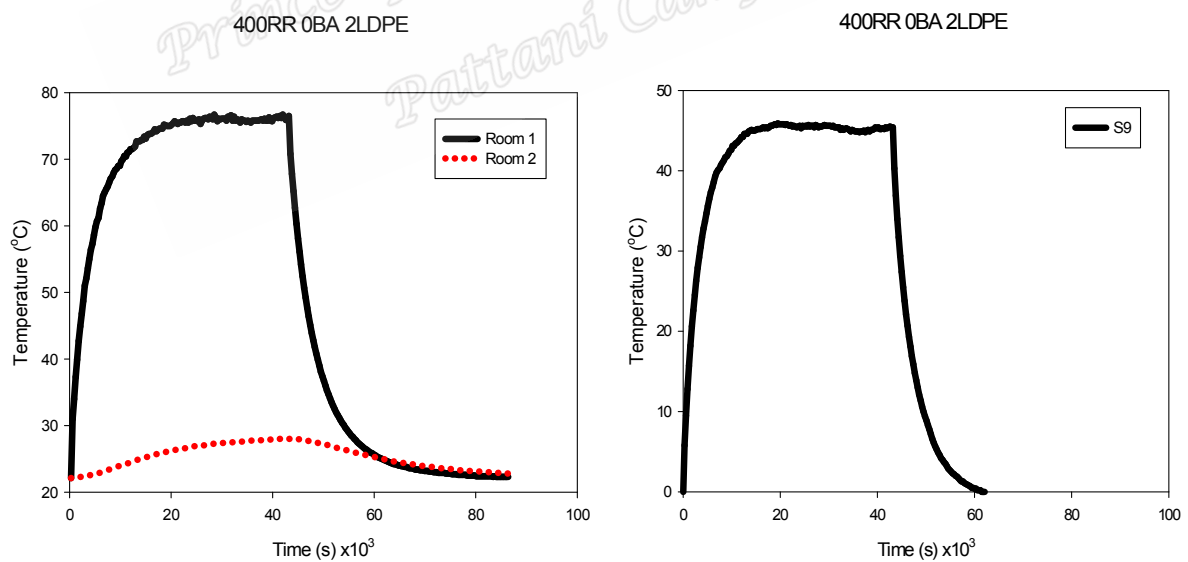
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 4 phr



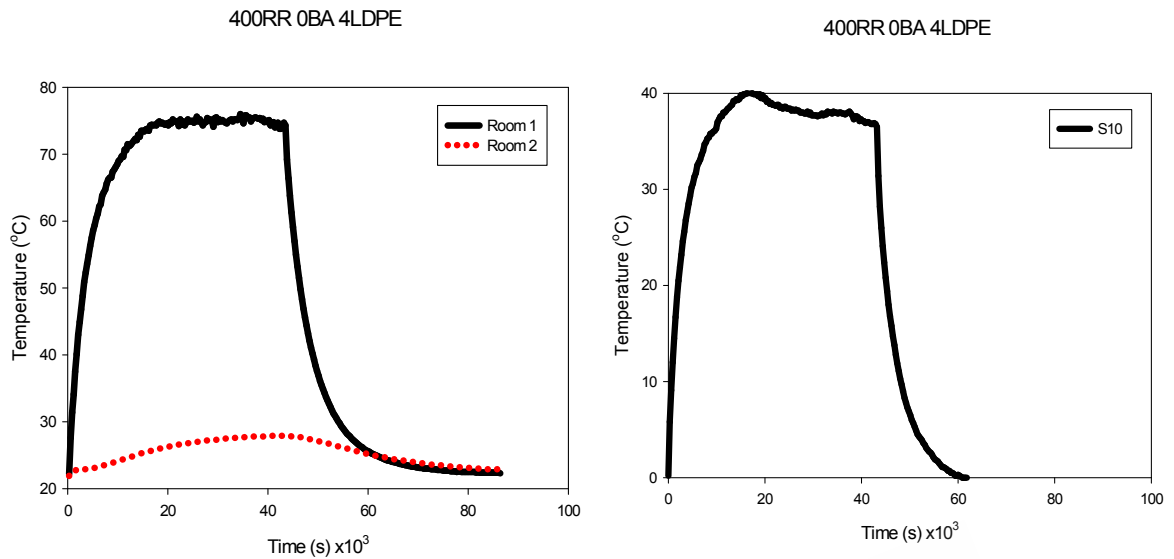
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 6 phr



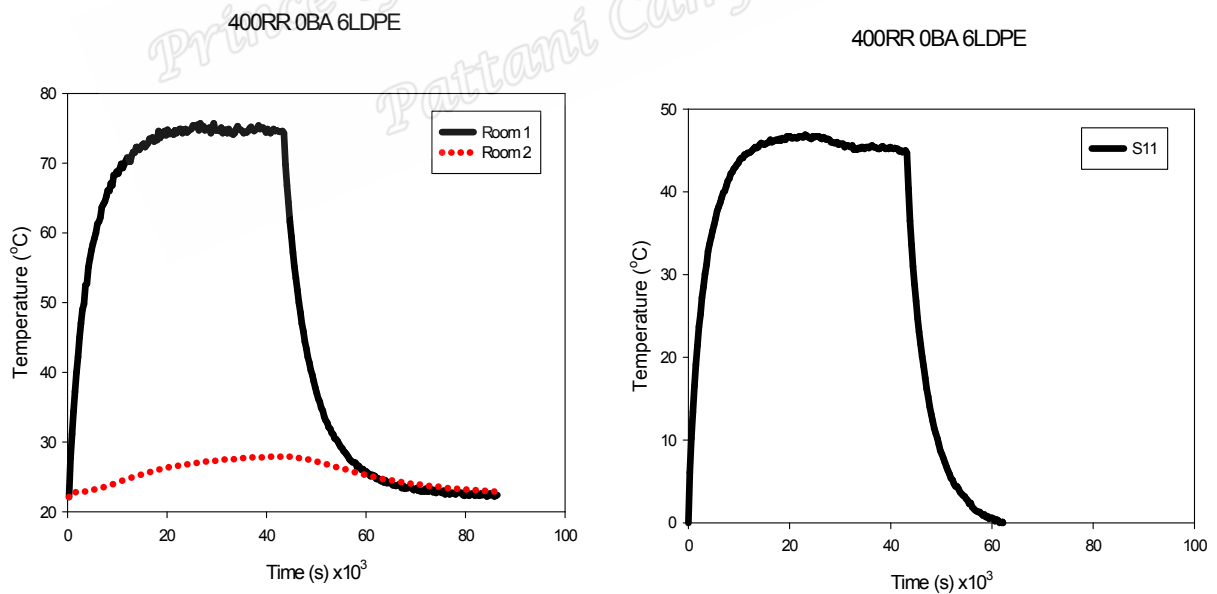
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 8 phr



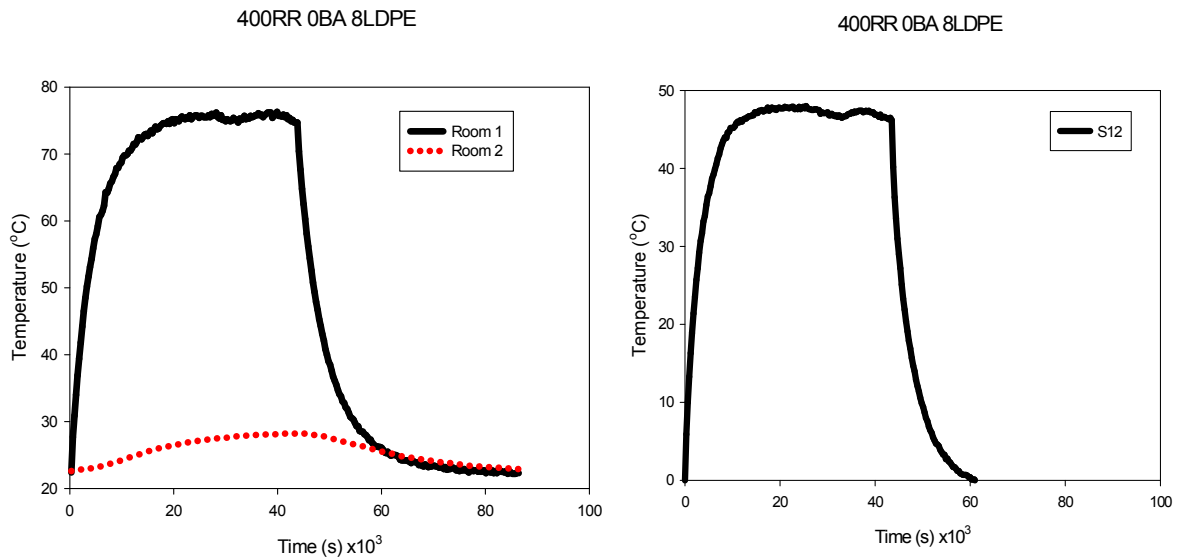
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2 phr



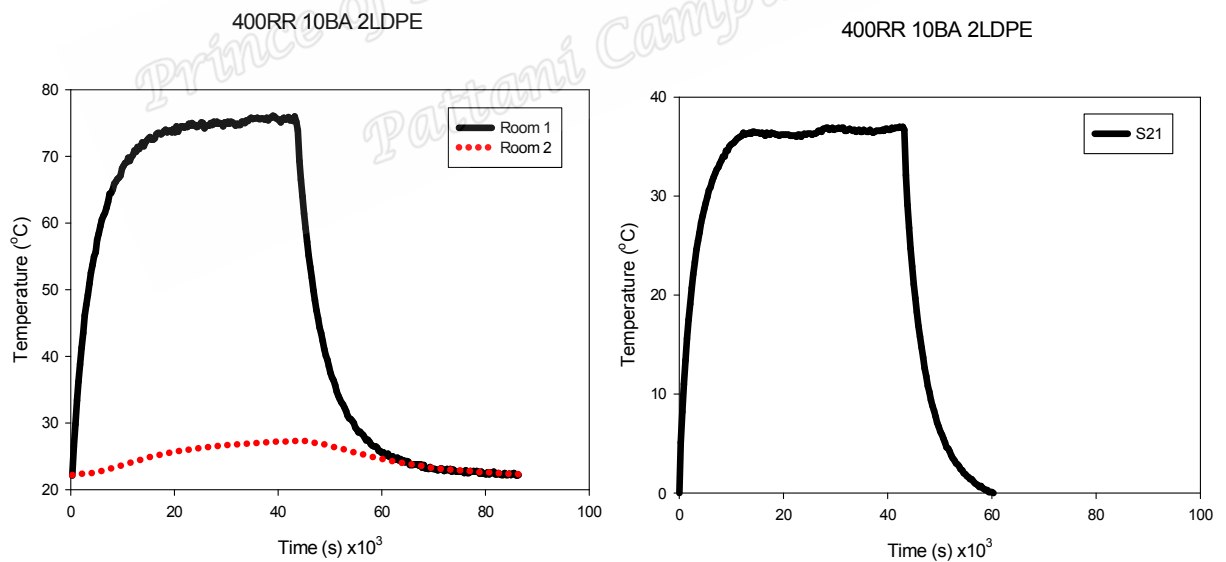
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 4 phr



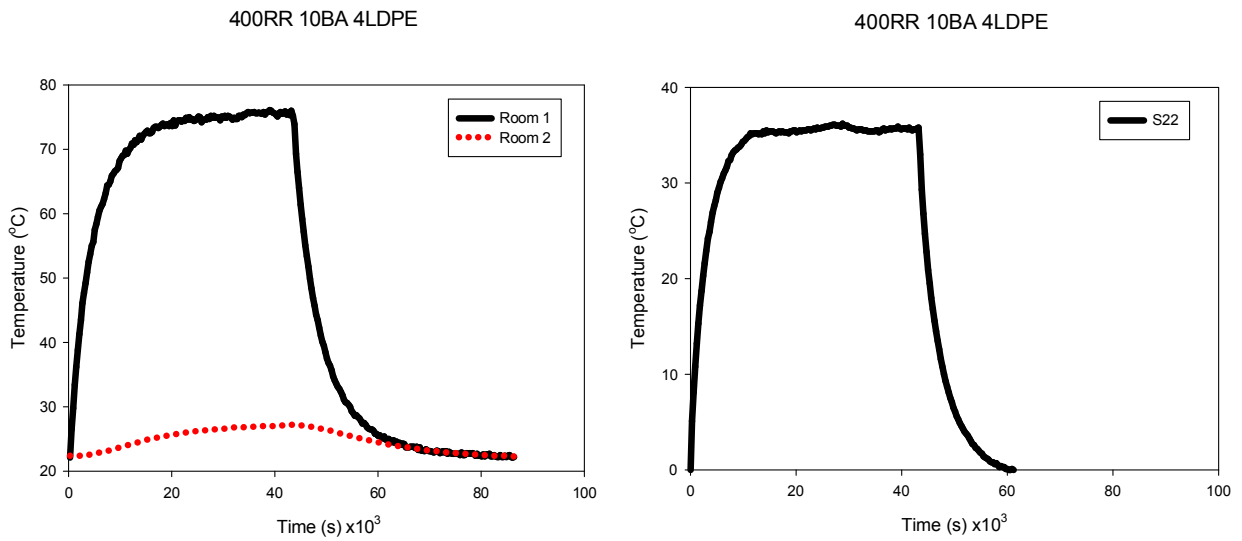
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 6 phr



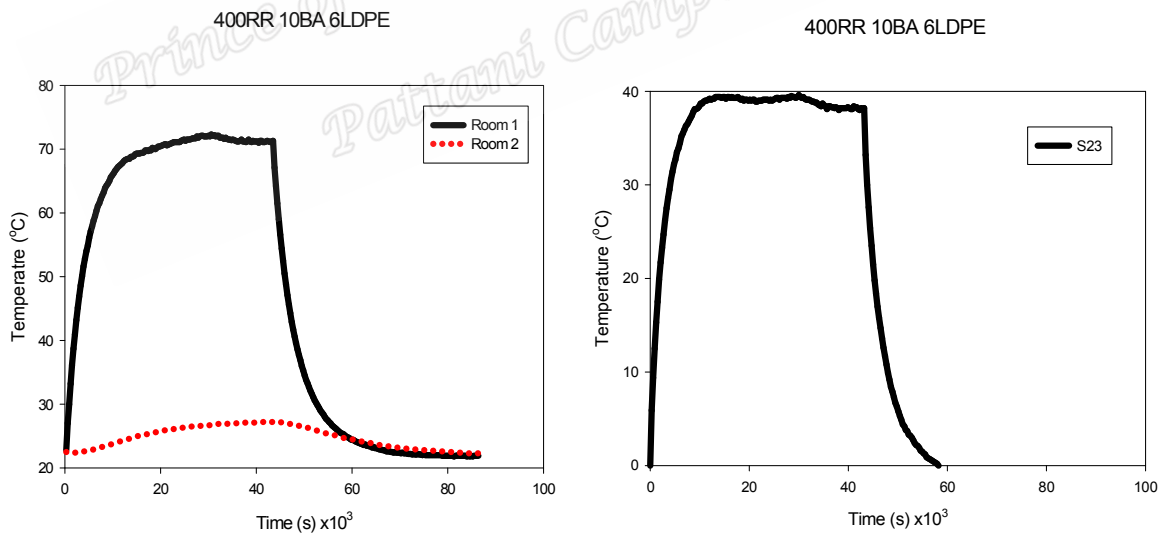
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 8 phr



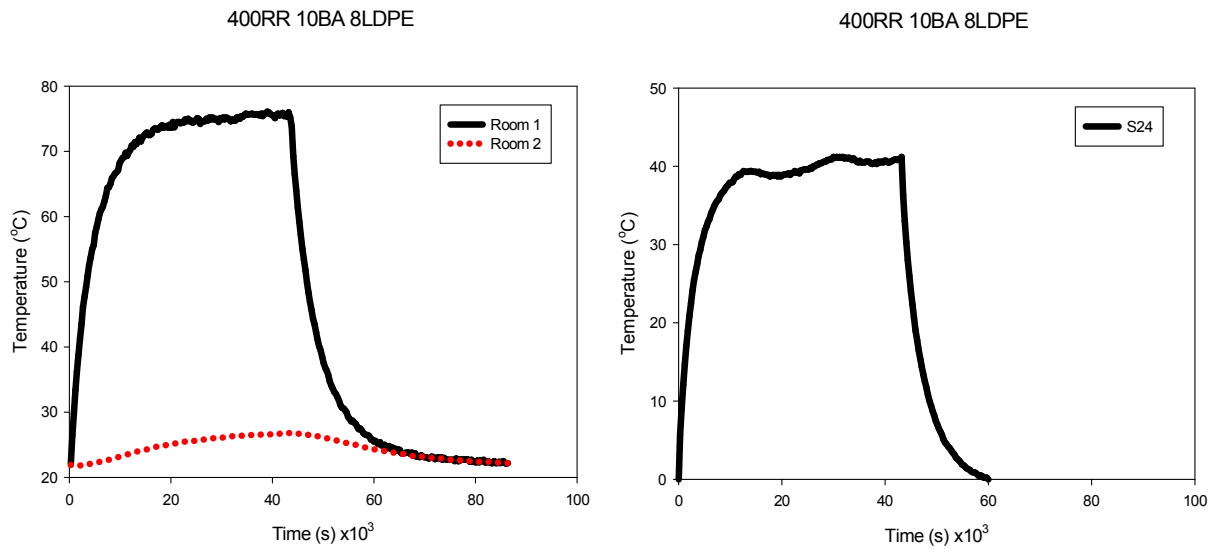
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2 phr



กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 4 phr



กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 6 phr



กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมผัสตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 8 phr

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ข

- ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าความเค้น ค่าร้อยละการยืด และค่าความหนาแน่นของแผ่นตัวอย่างสูตรต่าง ๆ

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ผ.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ปริมาณสารตัวเติมต่างๆ

สารก่อฟอง (phr)	ยางรีเคลม (phr)	เศษแผ่นฟิล์ม LDPE (phr)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m-K)
0	0	2	5.1282×10^{-3}
0	0	4	5.0388×10^{-3}
0	0	6	3.8398×10^{-3}
0	0	8	3.8149×10^{-3}
0	200	2	5.2672×10^{-3}
0	200	4	4.6798×10^{-3}
0	200	6	3.7900×10^{-3}
0	200	8	2.9099×10^{-3}
0	400	2	3.5342×10^{-3}
0	400	4	3.2599×10^{-3}
0	400	6	2.5376×10^{-3}
0	400	8	2.2067×10^{-3}
10	0	2	5.1906×10^{-3}
10	0	4	4.7015×10^{-3}
10	0	6	2.9099×10^{-3}
10	0	8	1.8342×10^{-3}
10	200	2	5.1320×10^{-3}
10	200	4	4.6883×10^{-3}
10	200	6	2.9330×10^{-3}
10	200	8	1.8434×10^{-3}
10	400	2	3.6240×10^{-3}
10	400	4	2.8868×10^{-3}
10	400	6	2.2067×10^{-3}
10	400	8	4.1885×10^{-4}

ตารางที่ ผ.2 แสดงค่าความเค้นและร้อยละการยืดของตัวอย่างที่ความเร็ว 50, 100 และ 200 มม./นาทึ

ตัวอย่าง/ ความเร็ว	50 มม./นาทึ		100 มม./นาทึ		200 มม./นาทึ	
	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%
S1	0.194	749	0.236	554	0.092	218
S2	0.239	708	0.239	663	0.098	220
S3	0.263	721	0.258	707	0.104	226
S4	0.281	719	0.263	936	0.109	228
S5	0.471	776	0.369	777	0.320	834
S6	0.411	778	0.401	778	0.337	832
S7	0.401	767	0.410	779	0.373	782
S8	0.370	754	0.471	780	0.397	734
S9	0.163	301	0.163	308	0.127	415
S10	0.175	308	0.175	307	0.196	385
S11	0.184	307	0.183	301	0.209	397
S12	0.200	291	0.200	291	0.225	398
S13	0.745	218	0.745	218	0.547	214
S14	0.652	204	0.652	198	0.625	213
S15	0.612	204	0.615	204	0.707	208
S16	0.537	198	0.536	201	0.730	205
S17	0.504	809	0.504	809	0.517	808
S18	0.385	773	0.385	773	0.489	780
S19	0.320	757	0.319	754	0.434	729
S20	0.284	747	0.284	747	0.334	721
S21	0.283	408	0.282	408	0.321	480
S22	0.276	404	0.276	407	0.285	434
S23	0.253	400	0.254	404	0.257	433
S24	0.215	381	0.215	384	0.225	401

ตารางที่ ผ.3 แสดงค่าความเค้นและร้อยละการยืดของตัวอย่างที่ความเร็ว 300 และ 400 มม./นาที

ตัวอย่าง/ ความเร็ว	300 มม./นาที		400 มม./นาที	
	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%
S1	0.117	1081	0.157	451
S2	0.263	921	0.192	582
S3	0.321	880	0.232	579
S4	0.342	822	0.283	615
S5	0.246	810	0.232	530
S6	0.326	725	0.256	521
S7	0.345	721	0.273	518
S8	0.374	713	0.289	515
S9	0.190	461	0.211	504
S10	0.209	448	0.224	499
S11	0.243	440	0.261	456
S12	0.289	386	0.304	345
S13	0.835	2307	0.692	2010
S14	0.743	2195	0.628	2005
S15	0.645	2102	0.575	1936
S16	0.568	2101	0.550	1921
S17	0.454	645	0.565	783
S18	0.410	620	0.513	731
S19	0.375	616	0.422	663
S20	0.268	611	0.294	709
S21	0.305	399	0.318	440
S22	0.260	395	0.283	434
S23	0.215	392	0.265	415
S24	0.202	374	0.189	389

ตารางที่ ผ.4 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ

ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น (Kg/m ³)	ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น (Kg/m ³)
S1	0.937	S13	1.796
S2	0.923	S14	1.782
S3	0.913	S15	1.771
S4	0.907	S16	1.764
S5	1.075	S17	1.054
S6	1.061	S18	1.038
S7	1.037	S19	1.026
S8	1.013	S20	1.007
S9	1.105	S21	1.084
S10	1.089	S22	1.078
S11	1.079	S23	1.063
S12	1.066	S24	1.052

ภาคผนวก ค

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

- บทความ (Proceeding) จากการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ในงานประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 17-18 สิงหาคม 2560

Prince of Songkhla University
Pattani Campus

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

การใช้ยางพาราผสมยางรีเคลม เศษแผ่นฟิล์ม LDPE และสารก่อกองสำหรับแผ่นยางฉนวนกันความร้อน
Use of Natural Rubber mixed with Reclaimed Rubber LDPE film and Blowing Agent for Thermal insulation

สิยามา บินมะยะโกะ และ สมบัติ พุทธจักร

L. Binmayakok and S. Puttajukr

Science and Technology Faculty Prince of Songkla University, Pattani Campus, Rusamilae, Muang, Pattani 94000

*Corresponding author, E-mail: sombat.p@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เบลนด์กับยางรีเคลม (Reclaimed Rubber, RR) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) และผสมสารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing Agent, BA) วัตถุประสงค์เพื่อหาวัสดุฉนวนกันความร้อนประสิทธิภาพสูงและราคาถูกจากยางธรรมชาติ โดยปริมาณของ NR 100 phr ปริมาณของ RR 0, 200 และ 400 phr ปริมาณของ LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr และปริมาณของ BA 0 และ 10 phr ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ที่อุณหภูมิ 79 °C และความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง พบว่าสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ RR BA และ LDPE ที่ผสมเข้าไป และสูตรยางที่ดีที่สุด คือ สูตรยาง NR 100 phr RR 400 phr BA 10 phr ที่ผสม LDPE 8 phr ค่า k เท่ากับ 0.0004 W/m.K

คำสำคัญ: สมบัติการนำความร้อน ยางธรรมชาติ ฉนวนกันความร้อน

Abstract

This research was to study thermal properties of Natural rubber (NR) blended with reclaimed rubber (RR), Low density polyethylene (LDPE) and blowing agent (BA). It is aimed to find high performance NR insulator and low cost having fixed amount of NR was 100 phr, RR were 0, 200 and 400 phr, LDPE were 2, 4, 6 and 8 phr and BA were 0 and 10 phr. Thermal conductivity (k) was tested at 79 °C and density at room temperature. It was found that both of the properties mentioned were decreased when the amount of RR, BA and LDPE increased. The best formula of the NR thermal insulator is NR 100 phr RR 400 phr BA 10 phr and LDPE 8 phr. It has k value 0.0004 W/m.K.

Keywords: Thermal conductivity, Natural rubber, insulator

บทนำ

ในปัจจุบันผลกระทบที่เกิดจากภาวะโลกร้อนและปรากฏการณ์เรือนกระจก ที่เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมและการใช้รถยนต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการใช้ฉนวนกันความร้อนประสิทธิภาพสูงและราคาถูกผลิตจากวัสดุธรรมชาติจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการก่อสร้างส่วนประกอบของอาคารที่อยู่อาศัย (Kader et al., 2011) จากปูนซีเมนต์หรืออิฐบล็อกที่นำมาทำก่อสร้างอาคารนั้นมีสมบัติฉนวนกันความร้อนยังไม่ดีพอกับความร้อนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวัสดุใหม่ที่มีหลายกลไกในการดูดซับความร้อน โดยใช้ยางธรรมชาติเบลนด์กับยางรีเคลม พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และสารก่อกองอากาศ โดยใช้ยางมีการยับตัวได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นภายใต้หลักการรีโอโลยี (สมบัติ พุทธจักร, 2554) อนุภาคของยางรีเคลมที่ทำจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วจะเป็นโครงสร้างรูพรุนทำให้เพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนได้อีก (Benkreira et al., 2011.) (Bulent Yesilata et al., 2009.) ส่วนแผ่นฟิล์ม LDPE มีความยืดหยุ่นทำให้ขึ้นงานนิ่มและสามารถเพิ่มการเป็นฉนวนความร้อนได้อีก

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

กลไก นอกจากนี้เมื่อผสม Sodium Bicarbonate เป็นสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ยิ่งเพิ่มกลไกในการดูดซับความร้อนจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศ ดังนั้นชิ้นงานที่ได้จากยางธรรมชาติเบลดยางรีเคลม พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศ ควรจะมีสมบัติการนำความร้อนน้อยลง นั่นคือสมบัติเป็นฉนวนความร้อนมากขึ้น

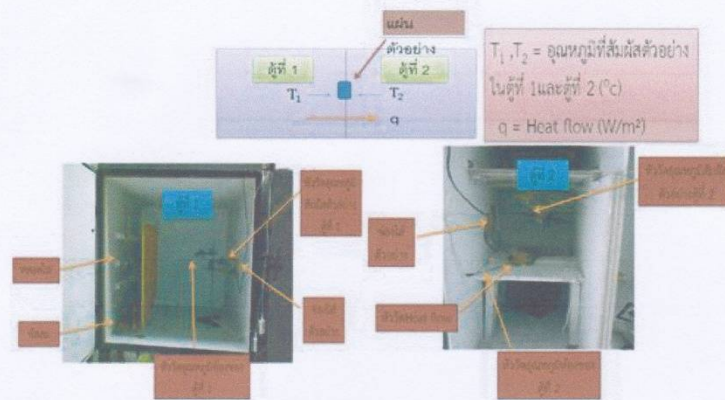
ตารางที่ 1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุบางชนิด (Bailly, M., 1994.)

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (k) (W/m.K)
โลหะบริสุทธิ์	35 - 430
โลหะผสม	20 - 200
โลหะเหลว	9 - 90
ของเหลว (อโลหะ)	0.2 - 2.0
ของแข็ง (อโลหะ)	0.02 - 20
ฉนวน	0.02 - 0.40
อะลูมิเนียม	237
คอนกรีต	1.82
ทองแดง	401
เพชร	2300
น้ำแข็ง	2.2
กระดาษ	0.05
ไม้	0.1 - 0.35
เงิน	429

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเกรด STR 5L ยางรีเคลมที่ทำจากรถยนต์ที่ใช้แล้วนำมาบดให้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุผักและผลไม้ ผลิตโดยบริษัท ทานตะวันอุตสาหกรรม จ.นครปฐม สารเคมีที่ใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ชนิด White seal เป็นสารเคมีที่ใช้ในการเริ่มต้นปฏิกิริยา กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารเคมีสีขาวที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา Tetramethyl Thiuram Disulphide (TMTD) เป็นสารเคมีที่ใช้ร่วมกับ ZnO และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม N-phenyl-N-1, 3-dimethylbutyl-phenylenediamine (6PPD) สารแอนติออกซิแดนต์ เป็นสารเคมีที่ช่วยไม่ให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ Sodium Bicarbonate เป็นสารที่ทำให้เกิดฟอง กำมะถัน (Sulphur) เป็นสารตัวสุดท้ายที่ใช้ในการผสมยาง เป็นตัวที่ทำให้พันธะโควาเลนต์ระหว่างโซ่ยาง เครื่องชั่งไฟฟ้า ความละเอียด 0.0001 g เครื่องบดและผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) เครื่องหาเวลาสุกของยาง แบบ Oscillating Disc Rheometer เครื่องขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัด (Compression Moulding) ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อน หัววัดอุณหภูมิ (Smart Temperature Sensor) และหัววัดความร้อนที่ส่งผ่าน (Smart Q Heat flow Sensor) ชุดเก็บข้อมูล (Data Logger) รุ่น EASY SENSE Advanced ผลิตโดยบริษัท DATA HARVEST (นพดล ผลไชย, 2551) นำมาประกอบและสร้างตู้หุ้มฉนวนความร้อน 3 ชั้นพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 1 ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

ตู้ที่ 1 จะมีหลอดไฟเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อน พัดลมเป็นตัวช่วยกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอทั่วตู้ ระหว่างตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 มีช่องว่างแล้ววางแผ่นยางไว้ให้ความร้อนไหลผ่านจากตู้ที่ 1 ไปตู้ที่ 2 มีหัววัดพลังความร้อน ($q, \text{W/m}^2$) ที่ส่งผ่านติดกับแผ่นยางในตู้ที่ 2 มีหัววัดอุณหภูมิภายในตู้ทั้งสอง และหัววัดอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสแผ่นยาง (ΔT) และวัดความหนาเฉลี่ยของแผ่นยาง (ΔX) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามสมการ $q = k \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$ (นพดล ผลไชย, 2551) เครื่องทดสอบความหนาแน่นระบบไฟฟ้า (Electric Densitymeter) รุ่น MD - 300S ผลิตโดยบริษัท Alfa Mirage และใช้หลักการอาร์คมิติสในการคำนวณหาความหนาแน่น ซึ่งมวลในอากาศ ซึ่งมีมวลในน้ำ หาปริมาตรโดยการแทนที่น้ำ เครื่องทำงานโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์และวัดละเอียดได้ 0.001 g/cm^3 โดยการนำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $4 \times 4 \text{ cm}^2$ แล้วหาความหนาแน่น



ภาพที่ 2 เครื่องทดสอบความหนาแน่นระบบไฟฟ้า

1. ออกแบบสูตรยางผสมแล้ว ทำการผสมยางธรรมชาติกับยางรีเคลมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยนำยางธรรมชาติปริมาณ 100 phr มาผสมกับยางรีเคลมในปริมาณ 0, 200, 400 phr และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในปริมาณ 2, 4, 6, 8 phr ตามลำดับ ผสมสารที่ทำให้เกิดฟองปริมาณ 0 และ 10 phr การผสมยางในแต่ละสูตรด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยสูตรที่ไม่ใช้ยางรีเคลมใช้เวลา 20 นาที และสูตรที่ใช้ยางรีเคลมใช้เวลาในการผสม 15 นาที (ความหนืดลดลง) ดังตารางที่ 2 -3 (s1 -s24) หลังจากผสมแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหาเวลาสุกของยางด้วยเครื่อง รีโอมิเตอร์แบบแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) แล้วจึงนำยางดังกล่าว

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

ไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิและใช้เวลาดำที่ได้จากเครื่อง ODR ได้แผ่นยางผสมขึ้นรูปแล้วที่มีความหนา 1 mm.

ตารางที่ 2 สูตรการผสมยางสูตร BA 0 phr

Chemical	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12
NR*	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
RR**	0	0	0	0	200	200	200	200	400	400	400	400
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TMTD	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6PPD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LDPE***	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
BA****	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

ตารางที่ 3 สูตรการผสมยางสูตร BA 10 phr

Chemical	s13	s14	s15	s16	s17	s18	s19	s20	s21	s22	s23	s24
NR*	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
RR**	0	0	0	0	200	200	200	200	400	400	400	400
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TMTD	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6PPD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LDPE***	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
BA****	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

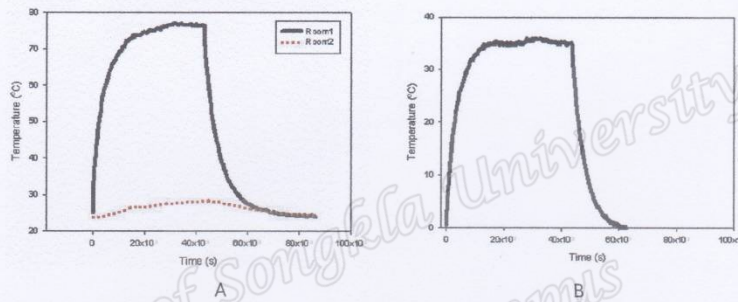
* Natural Rubber, ** Reclaimed Rubber, *** Low Density Polyethylene, **** Blowing Agent

2. การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน เป็นการทดลองบนพื้นฐานของสมการฟิลิกส์ ใช้ตุ้มถ่วง 3 ชิ้น เพื่อไม่ให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมภายนอก และกำหนดอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 80 °C ให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวันกลางแจ้ง ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยนำชิ้นตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากการเตรียมนั้นมาติดกันระหว่างตุ้ทั้งสอง เพิ่มอุณหภูมิตุ้ที่ 1 จาก 25 องศาเซลเซียส ถึง 79 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง อุณหภูมิตุ้ที่ 2 จะเพิ่มตามเล็กน้อย แล้วหยุดให้ความร้อน การวัดค่าต่างๆ ดำเนินไปอีก 12

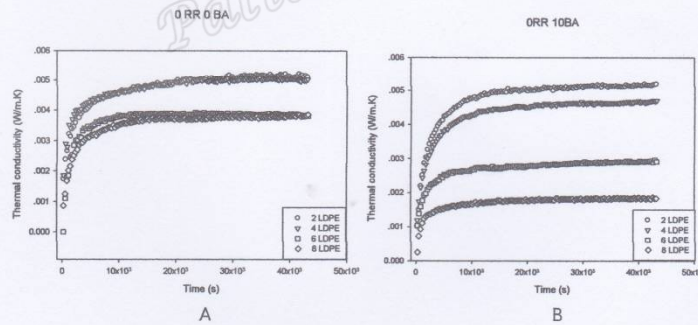
ชั่วโมง กระทั่งอุณหภูมิทั้งสองเท่ากันเหมือนที่จุดเริ่มต้น จากค่าต่างๆ ที่บันทึกได้แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เครื่องมือชุดนี้ควบคุมการทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ มีความไวในการวัดข้อมูลทุกวินาทีและวัดละเอียดได้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง การออกแบบสูตรยางต่างๆ เพื่อเพิ่มกลไกหลากหลายในการดูดซับความร้อน เช่น การดูดซับโดยการขยับตัวของโซ่ยาง การดูดซับโดยการขยับตัวเล็กน้อยของอนุภาคยางรีเคลม การดูดซับจากโมเลกุลของอากาศในช่องอากาศที่เกิดจากสารก่อฟองและยังถูกกันด้วยเศษแผ่นฟิล์ม LDPE จึงส่งผลให้เห็นได้ว่า อุณหภูมิของตู้ที่ 2 เมื่อกันด้วยแผ่นฉนวนเหล่านี้ทำให้อุณหภูมิของตู้ที่ 2 เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4 °C เท่านั้น ในขณะที่ตู้ที่ 1 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 79 °C ซึ่งการวัดฉนวนความร้อนแบบดั้งเดิมนั้นเป็นการดูดซับความร้อนเพียง 1 กลไกเท่านั้น

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ของแต่ละสูตร นำข้อมูลผลการทดลองมาเขียนกราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิ สัมผัส กับเวลา ดังรูปที่ 3 กราฟค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลา ดังรูปที่ 4- รูปที่ 6

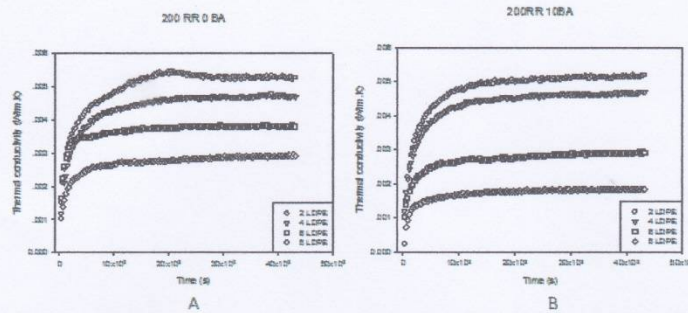


ภาพที่ 3 A กราฟอุณหภูมิของตู้ทดสอบการนำความร้อน ตู้ที่ 1 และ ตู้ที่ 2 B กราฟผลต่างอุณหภูมิต่างระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นยาง $\Delta T = T_1 - T_2$

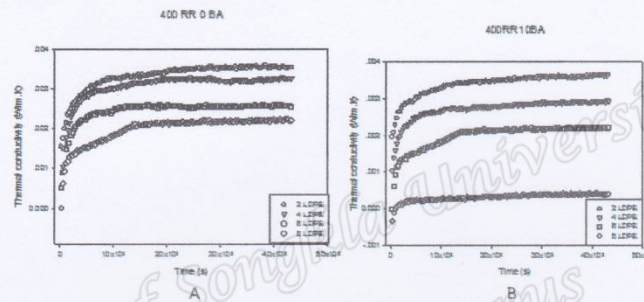


ภาพที่ 4 A สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
 1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
 วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

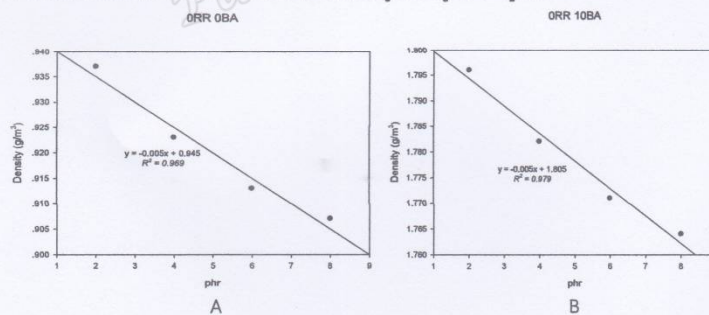


ภาพที่ 5 A สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 200 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 200 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

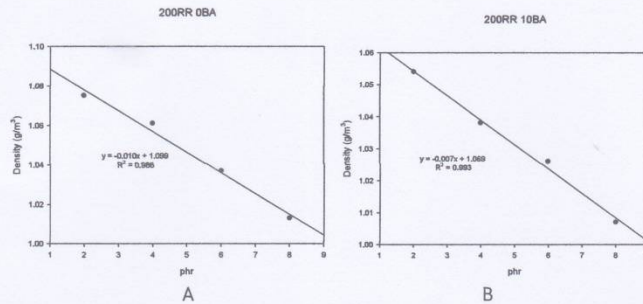


ภาพที่ 6 A สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 400 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 400 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

2. ค่าความหนาแน่น (Density) ของยางผสมแต่ละสูตร ดังรูปที่ 7- รูปที่ 8



ภาพที่ 7 A ความหนาแน่นยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B ความหนาแน่นของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 8 A ความหนาแน่นการนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 200 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B ค่าความหนาแน่นการนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr RR 200 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

ผลการทดลองภาพที่ 3 A กราฟอุณหภูมิของตู้ทดสอบการนำความร้อน ตู้ที่ 1 และ ตู้ที่ 2 นั้นที่เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิตู้ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน เนื่องจากระหว่างตู้ทั้งสอง มีช่องว่างที่อากาศถ่ายเทระหว่างกันได้ หัววัดอุณหภูมิอ่านได้ค่าเดียว 25 องศาเซลเซียส ซึ่งยืนยันความแม่นยำของหัววัดอุณหภูมิ เมื่อนำแผ่นยางมาปิดกัน อุณหภูมิตู้ที่ 1 จาก 25 องศาเซลเซียส ถึง 79 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง แต่อุณหภูมิตู้ที่ 2 เพิ่มขึ้นประมาณ 28 องศาเซลเซียส (ขึ้นกับยางสูตรผสม) นั่นคือแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการเป็นฉนวนความร้อนเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดของห้องที่ 2 จะช้ากว่าเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดของห้องที่ 1 อันเป็นผลมาจากการหน่วงที่เกิดจากการยับตัวของโมเลกุลยาง (นพดล ผลไชย. 2551) (สมบัติ พุทธิจักร. 2554) ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางรีโอโลยี แรงเสียดทานระหว่างโซ่โมเลกุลยางเป็นกลไกหนึ่งที่สลายความร้อน (สมบัติ พุทธิจักร. 2555) นอกจากนี้ภายในโครงสร้างอนุภาคยางรีโอโลยีที่มีอากาศอยู่ และเมื่อผสมสารก่อกองอากาศเข้าไปความเป็นฉนวนความร้อนยิ่งมากตาม อันเป็นผลจากการเคลื่อนที่โมเลกุลอากาศที่ซึ่งอยู่ภายในแผ่นยางเป็นอีกกลไกหนึ่งที่สลายความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปในแผ่นยาง

สรุปผลการทดลอง

สมบัติเชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีโอโลยี พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และผสมสารที่ทำให้เกิดฟอง ทำให้ได้วัสดุฉนวนความร้อนประสิทธิภาพสูง ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่อุณหภูมิ 75 °C พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีโอโลยี สารที่ทำให้เกิดฟองและ LDPE ที่ผสมเข้าไป คือสูตรยาง NR 100 phr, RR 0 phr, BA 0 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ ค่า k ลดลงจาก 0.0052 – 0.0038 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr, RR 0 phr, BA 10 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0050 – 0.0019 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr, RR 200 phr, BA 0 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0051 – 0.0019 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr RR 200 phr BA 10 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0037 – 0.0021 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr, RR 400 phr, BA 0 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0052 – 0.0029 W/m.K สูตร NR 100 phr, RR 400 phr, BA 10 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0038 – 0.0004 W/m.K ส่วนความหนาแน่นของยางผสมแต่ละสูตรก็มีแนวโน้มลดลงอย่างมี

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

นัยสำคัญกับการนำความร้อน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า k ของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมซึ่งมีค่า 0.0080 W/m.K (สมบัติ พุทธจักร และคณะ, 2559)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ คือ ผู้บริหารคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ แผนกวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และบัณฑิต วิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย 30,000 บาท

เอกสารอ้างอิง

- Abdel, M.M., Kader, Abdel Wehab, S.M., Helal, M.A., and Hasan, H.H. (2011). Evaluation of thermal insulation and mechanical properties of waste rubber/natural rubber composites. HBRC Journal. 8(2012), 69-74
- Benkreira, H., Khan, A., and Horoshenkov, K.V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation material from elastomeric waste residues. Chemical Engineering Science. 66(2011), 4157-4171
- Bulent Yesilata, Yusuf Isiker, and Paki Turgut. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. Construction and Building Materials. 23(2009), 1878-1882
- นพดล ผลไชย. 2551. ผลของไหม้แลกและดีกรีเมนต์เฟดเตอร์ต่อสมบัติเชิงความร้อนของผนังยาง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร. 2547. สมบัติเชิงฟิสิกส์ เชิงรีโอโลยีและวิศวกรรมของยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร. 2554. รีโอโลยีขั้นสูงและการประยุกต์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร. 2555. เทอร์โมไดนามิกส์และการประยุกต์สำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร, ธรมิศ นาวรัตน์ และเนรุญชรา ศรีคะรัน. (2559). การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกแทรกแผ่นยางธรรมชาติ ผสมหยวกกล้วย. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 19(1), 75-83