

บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 ผลการหลอมและการทำเป็นฟริตของแก้วซิลิเกตตะกั่วสูง

จากการหลอมส่วนผสมแก้วซิลิเกตตะกั่วสูงที่มีอัตราส่วนผสม (wt%) ของตะกั่วแดง 71.67 , โปแตสเซียมคาร์บอเนต 12 และ ทราวย 16.33 โดยหลอมที่อุณหภูมิ 950 °C พร้อมทั้งแช่ไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อคืบเข้าหลอมแก้วออกจากเตาเพื่อทำเป็นฟริต พบว่า ส่วนผสมของแก้วดังกล่าวเกิดการหลอมตัวกลายเป็นน้ำแก้วเหลวที่มีการไหลตัวดี สามารถเทน้ำแก้วลงในน้ำได้ง่าย เมื่อทุบเข้าหลอมแก้วเพื่อตรวจสอบการกักกร่อนของแก้ว ปรากฏว่าเนื้อของแก้วหลอมแก้วยังคงสภาพเดิม ไม่เกิดการกักกร่อน

สำหรับการนำน้ำแก้วเหลวมาเทลงในน้ำเพื่อทำเป็นฟริตนั้น พบว่า น้ำแก้วเหลวจะเปลี่ยนสถานะเป็นแก้วแข็งหรือเป็นฟริตที่เกิดการแตกเป็นเกล็ดทันทีที่เทลงน้ำ เมื่อทำการกรองและทำให้แห้ง จะเห็นได้ว่า ลักษณะของฟริตเป็นเกล็ดเล็กๆที่ใส มีสีเหลืองอ่อน จากนั้นนำฟริตที่ได้นี้กลับเข้าหลอมที่อุณหภูมิ 850 °C และแช่ไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พร้อมกับทำเป็นฟริตอีกครั้งหนึ่ง พบว่าฟริตในครั้งที่ 1 เกิดการหลอมเป็นแก้วเหลวได้ดี มีการไหลตัวดีขึ้น ซึ่งลักษณะของฟริตที่ได้เหมือนกันทั้งสองครั้ง

3.2 ผลการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแก้วสำหรับหาค่า T_g ค่าครรชนีหักเหและความหนาแน่น

หลังจากนำน้ำแก้วที่ได้จากการหลอมฟริตครั้งที่สองมาขึ้นรูปในแบบพิมพ์โลหะ ทั้งรูปทรงกระบอกและสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่า น้ำแก้วเกิดการหลอมตัวที่ดีและมีการไหลตัวดีต่อการขึ้นรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเทแก้วเหลวลงในแบบพิมพ์ที่มีช่องขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร มีความยาว 10 เซนติเมตรนั้น กระทำได้ง่าย น้ำแก้วไหลลงช่องได้ดีจนกระทั่งเต็มช่องและตัวอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การขึ้นรูปเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถกระทำได้ง่ายเช่นเดียวกัน กล่าวคือน้ำแก้วไหลตัวได้ดี แม้กระจ่ายเต็มร่องขนาด 5 x 8 x 1.5 เซนติเมตร และหลังจากทิ้งไว้ให้แก้วแข็งตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 นาที สามารถถอดออกจากแบบพิมพ์ได้ง่าย ไม่เกาะติดแบบพิมพ์ นอกจากนี้ยังสามารถคงรูปร่างเป็นแท่งแก้วและแผ่นแก้วได้ตามต้องการ

3.3 ผลการอบแก้ว

เมื่อนำชิ้นงานแก้วทั้งสองรูปทรงเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ ผลปรากฏว่า ชิ้นงานแก้วยังคงรูปทรงเดิม ชิ้นงานแก้วมีความใส ไม่มีฟองอากาศ มีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนผสมมีการหลอมตัวทั้งหมด ได้แก้วที่เป็นเนื้อเดียวกัน และที่สำคัญคือแก้วไม่มีรอยแตกเสียหายใดๆ นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบเนื้อแก้วเพื่อดูว่ามีสิ่งเจือปนในเนื้อแก้วหรือไม่ด้วยเทคนิค Energy dispersive spectroscopy ผลปรากฏว่าเนื้อแก้วไม่มีสิ่งเจือปนในเนื้อแก้ว (ดูผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก)

3.4 ผลการเตรียมชิ้นทดสอบแก้วและการหาค่า T_g

ในการนำแท่งแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร มาตัดให้มีความยาว 2 เซนติเมตร และขัดผิวหน้าทั้งสองด้านให้เรียบ เมื่อตรวจสอบผิวหน้าของชิ้นทดสอบแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ปรากฏว่าชิ้นทดสอบแก้วที่ได้ไม่มีรอยแตกหรือรอยร้าวจากการตัด ผิวหน้าเรียบเป็นมันวาว ดังแสดงไว้แล้วในรูปที่ 30

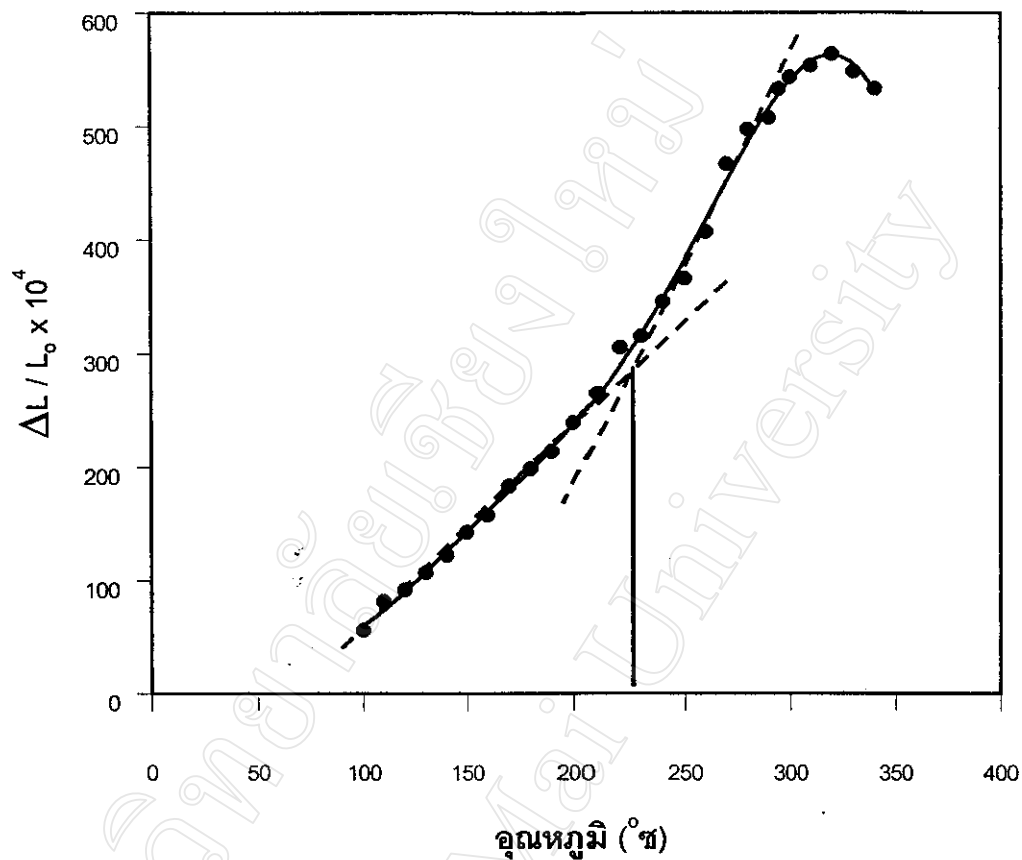


รูป 30 แสดงชิ้นทดสอบแก้วทั้งก่อนและหลังตัดเพื่อใช้หาค่า T_g

เมื่อนำชิ้นทดสอบแก้วมาหาค่า T_g ด้วยเครื่อง Dilatometer โดยเริ่มทดลองตั้งแต่อุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิที่แก้วเกิดการหดตัว ผลปรากฏว่า ชิ้นทดสอบแก้วเริ่มเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิ 100°C และเกิดการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 330°C ชิ้นทดสอบแก้วจะเกิดการหดตัว จึงหยุดทำการทดลอง ซึ่งผลจากการวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5 และเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 31

ตาราง 5 แสดงความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นทดสอบแก้วเมื่อได้รับความร้อน โดยชิ้นทดสอบแก้ว มีความยาวเริ่มต้น 19.7 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔL (มิลลิเมตร)	$\Delta L/L_0$ ($\times 10^{-4}$)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔL (มิลลิเมตร)	$\Delta L/L_0$ ($\times 10^{-4}$)
30	0	0	190	0.42	213.20
40	0	0	200	0.47	238.58
50	0	0	210	0.52	263.96
60	0	0	220	0.60	304.57
70	0	0	230	0.62	314.72
80	0	0	240	0.68	345.18
85	0	0	250	0.72	365.48
90	0	0	260	0.80	406.91
100	0.11	55.84	270	0.92	467.01
110	0.16	81.22	280	0.98	497.46
120	0.18	91.37	290	1.00	507.61
130	0.21	106.6	295	1.05	532.99
140	0.24	121.83	300	1.07	543.15
150	0.28	142.13	310	1.09	553.30
160	0.31	157.36	320	1.11	563.45
170	0.36	182.74	330	1.08	548.22
180	0.39	197.97	340	1.05	532.99



รูป 31 แสดงความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นทดสอบแก้วเมื่อได้รับความร้อน

ตามรูป 31 เห็นได้ว่าลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจึงได้ทำการลากเส้นตรงสองเส้นสัมผัสกับเส้นกราฟ (Extrapolate) โดยเส้นตรงเส้นที่ 1 ลากสัมผัสเส้นกราฟในช่วงแรก และเส้นที่ 2 ลากสัมผัสเส้นกราฟในช่วงท้าย ทำให้ได้จุดตัดของเส้นตรงสองเส้นนี้เป็นค่าของอุณหภูมิ T_g ที่อ่านค่าได้ 225°C สำหรับแก้วซิลิเกตตะกั่วสูงชนิดนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ถืออุณหภูมินี้เป็นค่า T_g ที่จะนำไปพิจารณาเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่อไป

3.5 ผลการเตรียมชิ้นทดสอบแก้วและการหาค่าครรชนหักเหและความหนาแน่นเริ่มต้น

จากการนำแผ่นแก้วขนาด $5 \times 8 \times 1.5$ เซนติเมตร มาตัดและขัด ผลปรากฏว่า ชิ้นทดสอบ แก้วมีขนาด $0.5 \times 0.5 \times 0.3$ เซนติเมตร เมื่อตรวจผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่า ชิ้นทดสอบแก้วไม่มีรอยที่ผิวแก้วทุกด้าน ผิวแก้วเรียบและเป็นมันวาว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 32



รูป 32 แสดงดินทดสอบแก้วทั้งก่อนและหลังตัดเพื่อใช้หาค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่น

เมื่อนำดินทดสอบจำนวน 35 ชิ้น มาวัดค่าดรรชนีหักเหก่อนทดลองด้วยวิธี Direct method และความหนาแน่นก่อนทดลองด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักในน้ำ (Hydrostatic method) ผลการวัดแสดงในตารางที่ 6 และ ตารางที่ 7 ตามลำดับ

ตาราง 6 แสดงค่าดรรชนีหักเหของดินทดสอบแก้วก่อนทำการทดลอง

ดินทดสอบแก้ว	ระยะโฟกัส			ดรรชนีหักเห = $A - C$ $A - B$
	A	B	C	
1	193	90	0	1.874
2	228.5	107	0	1.881
3	246.5	115	0	1.875
4	289.5	135	0	1.874
5	274	128	0	1.877
6	290	135	0	1.871

ตาราง 6 แสดงค่าดัชนีหักเหของชั้นทดสอบแก้วก่อนทำการทดลอง (ต่อ)

ชั้นทดสอบแก้ว	ระยะโฟกัส			ดัชนีหักเห = $\frac{A - C}{A - B}$
	A	B	C	
7	291.5	136	0	1.875
8	210	98	0	1.875
9	265	123.5	0	1.873
10	196	91.5	0	1.876
11	201	94	0	1.879
12	199	93	0	1.877
13	193.5	91	0	1.879
14	313	146	0	1.874
15	196.5	91.5	0	1.871
16	169.5	91.5	0	1.852
17	222	120	0	1.850
18	217.5	117.5	0	1.854
19	235	127	0	1.850
20	199	107.5	0	1.851
21	110	238	0	1.859
22	122	264	0	1.859
23	120	260	0	1.857
24	104	225	0	1.860
25	112.5	244	0	1.856
26	82	178	0	1.854
27	100.8	219	0	1.853
28	151.5	328	0	1.858
29	89	193.5	0	1.852
30	89	193	0	1.856
31	109	237	0	1.852
32	126	273	0	1.857
33	131	287.5	0	1.853
34	3385	185	0	1.850
35	11340	238	0	1.859

ตาราง 7 แสดงค่าความหนาแน่นของหินทดสอบแก้วก่อนทำการทดลอง

หินทดสอบแก้ว	น้ำหนัก(กรัม)		ความหนาแน่น = $\frac{W_1 \times \rho_{\text{น้ำ}}}{W_2}$ (กรัม/ลบ.ซม.)
	W_1	W_2	
1	0.8580	0.1593	5.3678
2	0.5203	0.0964	5.3790
3	0.6439	0.1197	5.3610
4	0.9972	0.1849	5.3479
5	0.7328	0.1358	5.3779
6	0.5153	0.0957	5.3663
7	0.4112	0.0763	5.3710
8	0.4960	0.0920	5.3730
9	0.5110	0.0949	5.3664
10	0.3680	0.0682	5.3776
11	0.4025	0.0747	5.3700
12	0.3855	0.0716	5.3658
13	0.2944	0.0547	5.3638
14	0.7905	0.1469	5.3630
15	0.4805	0.0890	5.3806
16	0.5242	0.0983	5.3230
17	0.3624	0.0681	5.3120
18	0.4395	0.0822	5.3370
19	0.4574	0.0859	5.3152
20	0.4877	0.0915	5.3204
21	0.4033	0.0753	5.3427
22	0.3258	0.0614	5.2932
23	0.3727	0.0697	5.3341
24	0.5933	0.1120	5.2843
25	0.5047	0.1015	5.3140
26	0.2980	0.0560	5.3084
27	0.4293	0.0809	5.2970
28	0.4581	0.0862	5.3049
29	0.3604	0.0678	5.3061
30	0.5200	0.0979	5.3020
31	0.2681	0.0503	5.3204
32	0.6528	0.1217	5.3544
33	0.4538	0.0855	5.2946
34	0.3760	0.0705	5.3237
35	0.4810	0.0902	5.3195

3.6 ผลการวัดค่าดัชนีหักเหและความหนาแน่นหลังอบแก้วที่สภาวะต่างๆ

หลังจากที่ทราบอุณหภูมิ T_g ของแก้วที่มีค่าประมาณ 225°C ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแก้วประกอบด้วย 175°C ($T_g - 50^{\circ}\text{C}$) , 225 (T_g) และ 275°C ($T_g + 50^{\circ}\text{C}$) ส่วนระยะเวลาในการอบแก้วแต่ละอุณหภูมิเป็น 4 , 8 , 12 , 16 , 20 , 24 , 36 , 48 , 60 ชั่วโมงตามลำดับ ทั้งนี้ในการทดลองแต่ละอุณหภูมิใช้ชิ้นทดสอบแก้วจำนวน 5 ชิ้น ที่มีค่าดัชนีหักเหและความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน

ผลการวัดได้แสดงดังตารางที่ 8 ถึง 13 รวมทั้งได้คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation ; S.D.) ดังสมการ

$$S.D. = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$$

n แทน จำนวนชิ้นทดสอบ

x_i แทน ค่าดัชนีหักเห หรือความหนาแน่นของแต่ละชิ้นทดสอบ

$\bar{x}$ แทน ค่าดัชนีหักเหเฉลี่ย หรือความหนาแน่นเฉลี่ย

จากนั้นนำข้อมูลจากตารางมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหและระยะเวลาอบแก้ว ดังกราฟรูปที่ 33 ถึง 35 และเขียนกราฟเฉลี่ยเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 36 ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและระยะเวลาอบแก้วแสดงดังรูปที่ 37 ถึง 39 และกราฟความหนาแน่นเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในกราฟรูปที่ 40

ตาราง 8 แสดงค่าดัชนีหักเหของชิ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิตอบ 175°C

เวลาอบแก้ว (ชั่วโมง)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	เฉลี่ย	S.D.
0	1.875	1.878	1.874	1.874	1.880	1.876	2.69×10^{-3}
4	1.837	1.839	1.864	1.884	1.892	1.863	0.025
8	1.857	1.864	1.898	1.918	1.956	1.889	0.041
12	1.866	1.883	1.907	1.928	1.935	1.904	0.029
16	1.874	1.883	1.907	1.916	1.951	1.906	0.030
20	1.889	1.891	1.907	1.925	1.942	1.911	0.023
24	1.876	1.913	1.918	1.923	1.955	1.917	0.028
36	1.906	1.920	1.935	1.910	1.956	1.925	0.020
48	1.910	1.914	1.932	1.936	1.968	1.932	0.023
60	1.915	1.921	1.930	1.945	1.962	1.935	0.019

ตาราง 9 แสดงค่าดัชนีหักเหของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอบ 225 °ซ

เวลาอบแก้ว (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	ชั้นที่ 8	ชั้นที่ 9	ชั้นที่ 10	เฉลี่ย	S.D.
0	1.879	1.874	1.871	1.875	1.877	1.875	3.04×10^{-3}
4	1.873	1.856	1.862	1.894	1.917	1.880	0.025
8	1.838	1.873	1.888	1.918	1.920	1.887	0.034
12	1.869	1.868	1.887	1.913	1.919	1.891	0.024
16	1.867	1.866	1.892	1.910	1.959	1.899	0.038
20	1.866	1.883	1.907	1.920	1.936	1.902	0.028
24	1.860	1.913	1.909	1.951	1.949	1.916	0.037
36	1.884	1.929	1.913	1.935	1.950	1.922	0.025
48	1.898	1.915	1.903	1.921	1.972	1.922	0.030
60	1.900	1.915	1.919	1.942	1.964	1.928	0.025

ตาราง 10 แสดงค่าดัชนีหักเหของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอบ 275 °ซ

เวลาอบแก้ว (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 11	ชั้นที่ 12	ชั้นที่ 13	ชั้นที่ 14	ชั้นที่ 15	เฉลี่ย	S.D.
0	1.874	1.876	1.877	1.871	1.873	1.874	2.40×10^{-3}
4	1.819	1.859	1.860	1.891	1.799	1.846	0.036
8	1.830	1.842	1.869	1.884	1.840	1.853	0.023
12	1.835	1.850	1.869	1.878	1.822	1.851	0.023
16	1.851	1.862	1.870	1.884	1.826	1.859	0.022
20	1.849	1.850	1.879	1.893	1.837	1.862	0.023
24	1.849	1.860	1.879	1.899	1.840	1.865	0.024
36	1.860	1.861	1.876	1.890	1.850	1.867	0.016
48	1.855	1.859	1.875	1.892	1.852	1.867	0.017
60	1.853	1.860	1.880	1.893	1.843	1.866	0.020

ตาราง 11 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 175°C

เวลาอบแก้ว (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	S.D.
0	5.3743	5.3709	5.3651	5.3612	5.3646	5.3672	5.27×10^{-3}
4	5.2602	5.1645	5.3635	5.4559	5.4927	5.3474	0.138
8	5.2690	5.2965	5.3653	5.4301	5.5057	5.3733	0.097
12	5.3200	5.3290	5.3661	5.4410	5.5066	5.3925	0.080
16	5.3896	5.3672	5.3937	5.4595	5.5392	5.4298	0.070
20	5.3699	5.3899	5.4937	5.5537	5.5748	5.4765	0.095
24	5.4123	5.4401	5.4987	5.5207	5.5560	5.4855	0.059
36	5.4797	5.4534	5.5173	5.5369	5.5495	5.5076	0.040
48	5.4858	5.4857	5.4995	5.5404	5.5476	5.5180	0.097
60	5.4870	5.4883	5.4979	5.5361	5.5475	5.5113	0.090

ตาราง 12 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 225°C

เวลาอบแก้ว (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	ชั้นที่ 8	ชั้นที่ 9	ชั้นที่ 10	เฉลี่ย	S.D.
0	5.3653	5.3751	5.3690	5.3711	5.3798	5.3721	5.59×10^{-3}
4	5.1655	5.2642	5.3685	5.4609	5.5027	5.3524	0.138
8	5.2003	5.2705	5.3195	5.4370	5.6351	5.3727	0.161
12	5.2990	5.3728	5.3324	5.4915	5.5073	5.4006	0.094
16	5.3214	5.4259	5.3278	5.4259	5.5139	5.4352	0.088
20	5.3329	5.4211	5.3009	5.5515	5.6703	5.4553	0.155
24	5.2091	5.4301	5.5381	5.4931	5.5571	5.4617	0.141
36	5.3061	5.5350	5.5490	5.5319	5.5700	5.4984	0.110
48	5.3065	5.5335	5.5520	5.5343	5.5680	5.4988	0.105
60	5.3100	5.5352	5.5528	5.5400	5.5702	5.5016	0.110

ตาราง 13 แสดงค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ขึ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 275°ซ

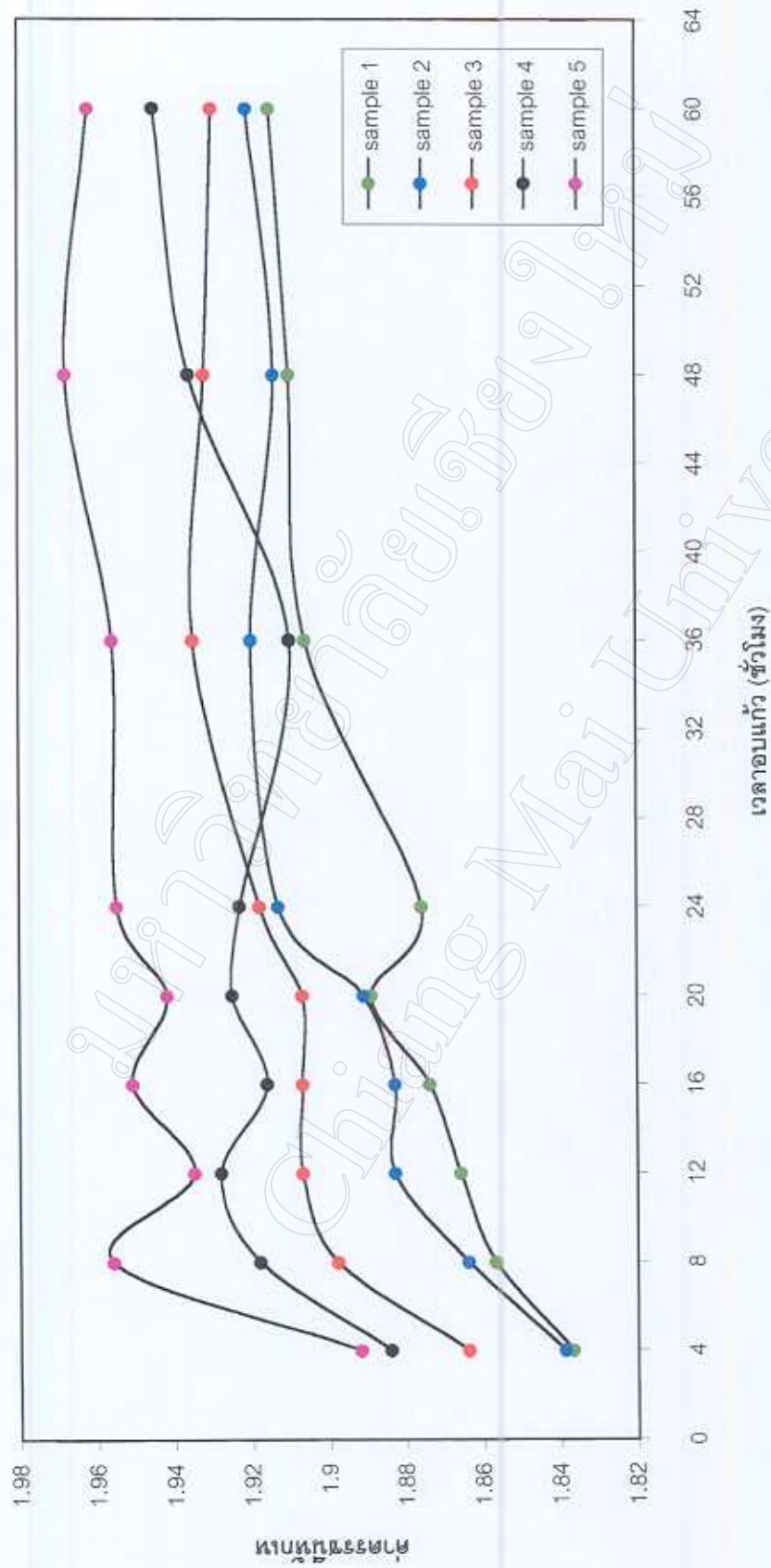
เวลาอบแก้ว (ชั่วโมง)	ขึ้นที่ 11	ขึ้นที่ 12	ขึ้นที่ 13	ขึ้นที่ 14	ขึ้นที่ 15	เฉลี่ย	S.D.
0	5.3680	5.3761	5.3643	5.3791	5.3687	5.3712	6.13×10^{-3}
4	5.1844	5.2470	5.3417	5.5038	5.1560	5.2866	0.167
8	5.2680	5.2305	5.3965	5.3662	5.2114	5.2945	0.083
12	5.2602	5.2821	5.3533	5.3872	5.3045	5.3174	0.052
16	5.3090	5.4097	5.4465	5.4370	5.3570	5.3918	0.058
20	5.2662	5.4930	5.4843	5.5741	5.1927	5.4021	0.164
24	5.4531	5.3495	5.5059	5.5113	5.2050	5.4050	0.130
36	5.3312	5.4271	5.4643	5.5215	5.3144	5.4112	0.088
48	5.3310	5.4271	5.4634	5.5315	5.3044	5.4112	0.094
60	5.3509	5.4025	5.4773	5.5123	5.3121	5.4110	0.078

ในรูป 33 - 35 แสดงค่าครรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ขึ้นเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 175 , 225 และ 275°ซ ตามลำดับ พบว่าลักษณะของกราฟที่ได้จากทั้ง 3 อุณหภูมิคล้ายกัน โดยช่วงเวลาอบแก้วช่วงแรก (4 ถึง 24 ชั่วโมง) เส้นกราฟจะมีความสับสน แต่มีแนวโน้มที่จะให้ค่าครรชนีหักเหสูงขึ้น ส่วนช่วงเวลาอบแก้วช่วงหลัง พบว่า เส้นกราฟเริ่มมีการคงที่ตามเวลา การอบแก้วที่นานขึ้น

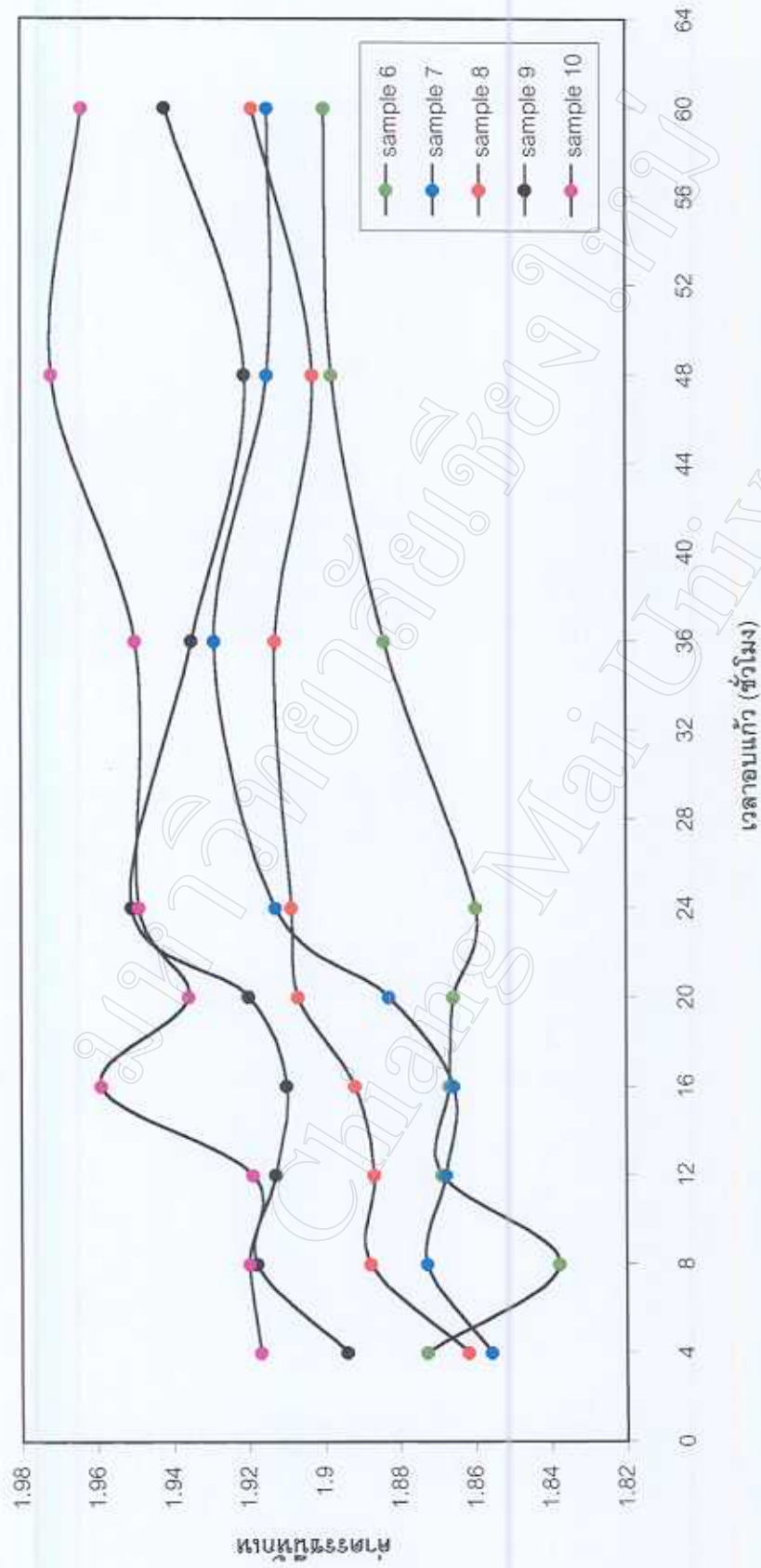
ในรูป 36 แสดงค่าครรชนีหักเหเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะพบว่า เส้นกราฟของอุณหภูมิการอบที่ 275°ซ จะคงที่เร็วที่สุด แต่จะให้ค่าครรชนีหักเหที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 225 และ 175 °ซ ซึ่งต้องใช้เวลานานกว่าแต่มีค่าครรชนีหักเหสูงตามลำดับ

ในรูป 37 - 39 แสดงค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ขึ้นเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 175 , 225 และ 275°ซ ตามลำดับ พบว่าลักษณะของกราฟที่ได้จากทั้ง 3 อุณหภูมิจะคล้ายกัน และคล้ายกับกราฟระหว่างค่าครรชนีหักเหเทียบกับระยะเวลาอบแก้วด้วย นั่นคือ ในช่วงแรกของเวลาการอบแก้วที่ใช้เวลาน้อย เส้นกราฟจะแสดงความสับสน มีทั้งความหนาแน่นที่สูงขึ้นและต่ำลงอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อระยะเวลาการอบแก้วนานขึ้น เส้นกราฟจะเริ่มมีแนวโน้มที่คงที่ จนกระทั่งที่ 60 ชั่วโมง จะพบว่าเส้นกราฟจะมีค่าคงที่ในที่สุด

ในรูป 40 เป็นรูปกราฟแสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าการอบแก้วที่อุณหภูมิสูงนั้นความหนาแน่นจะมีแนวโน้มการคงที่ได้เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิการอบที่ต่ำ แต่จะให้ค่าความความหนาแน่นจะมีค่าต่ำกว่าการอบแก้วที่อุณหภูมิต่ำ



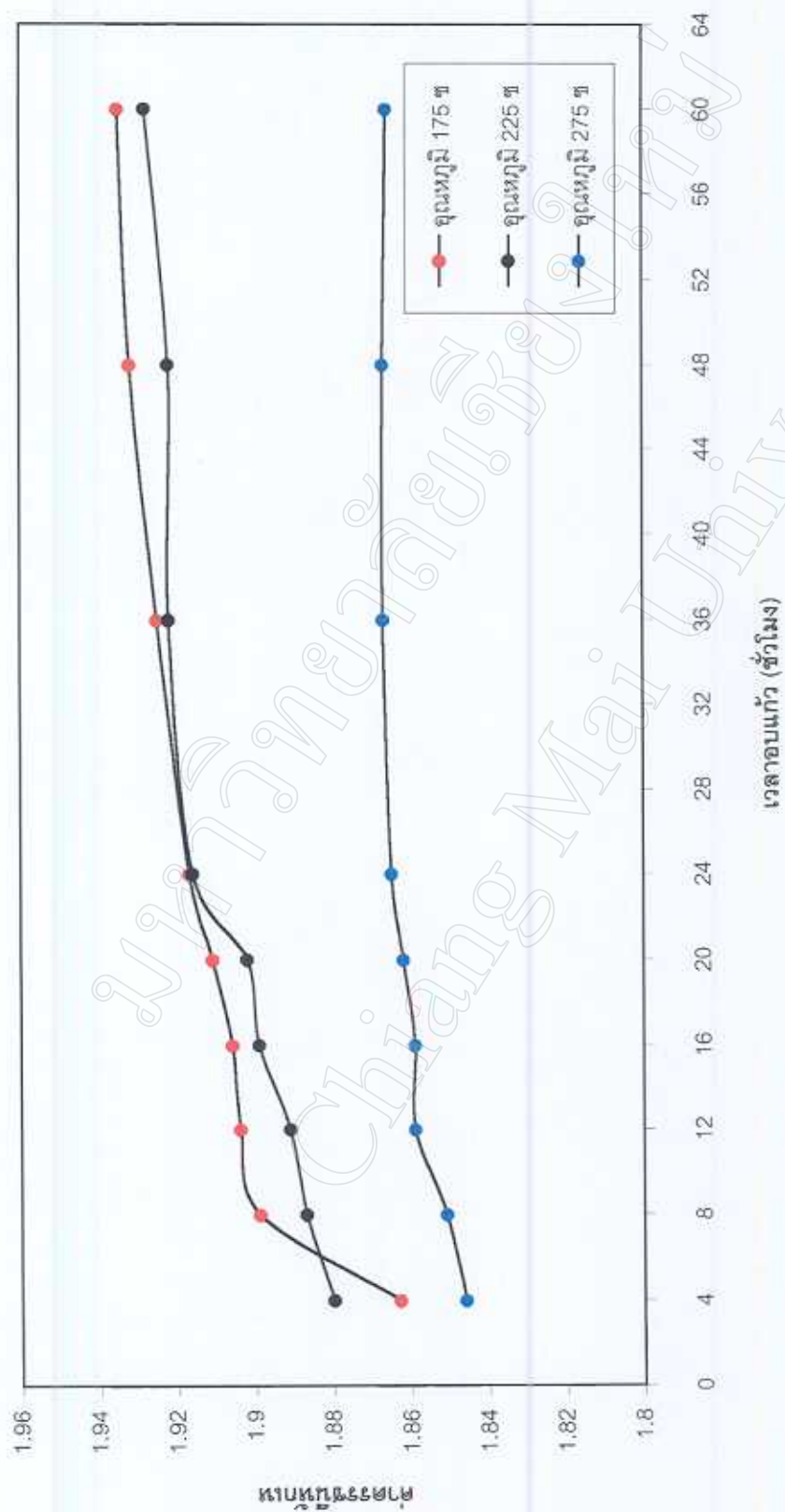
รูป 33 แสดงค่าเฉลี่ยนี้หักเหเทียบกับเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 175 °C



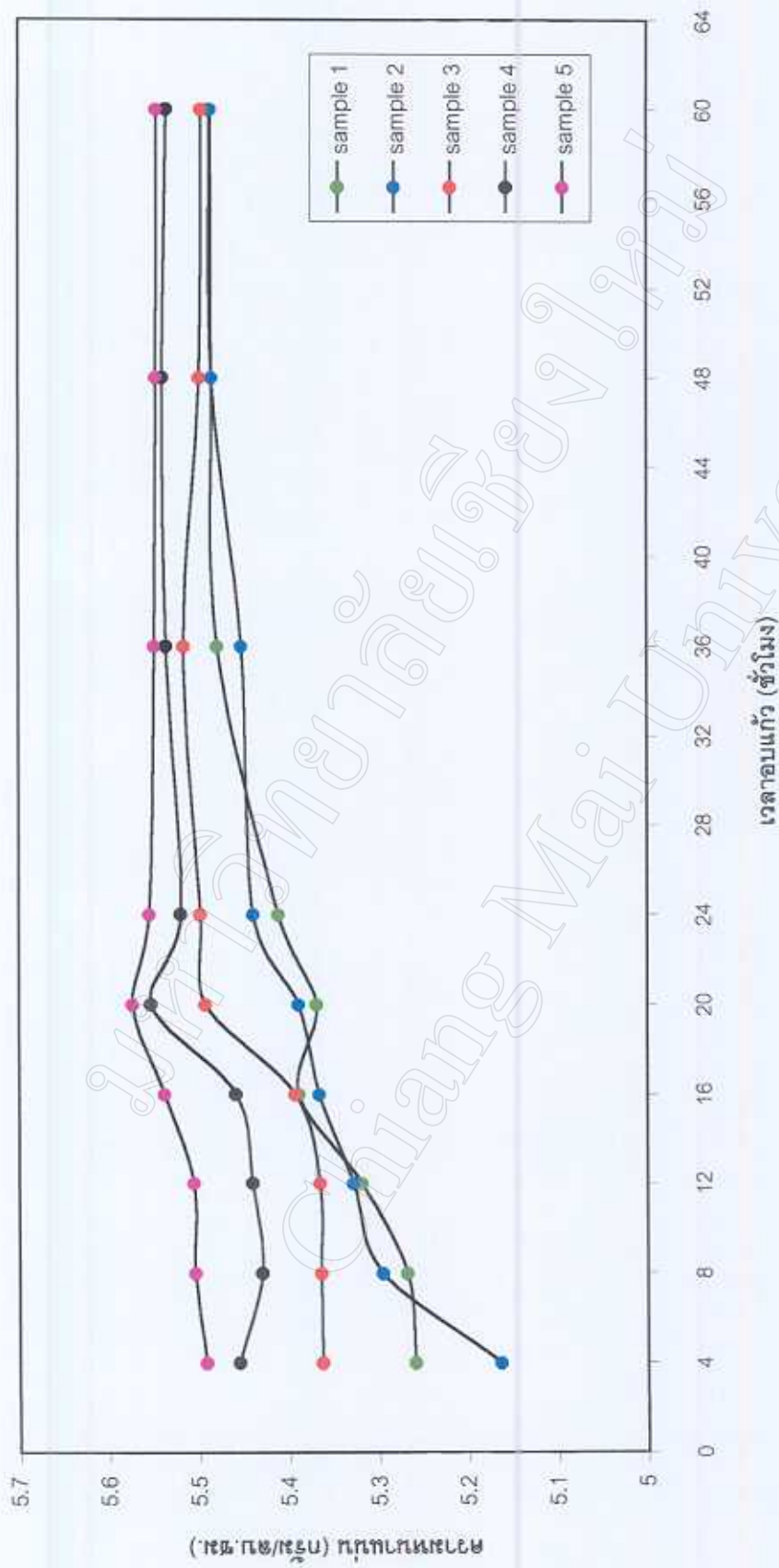
รูป 34 แสดงค่าดัชนีหักเหเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 225 °C



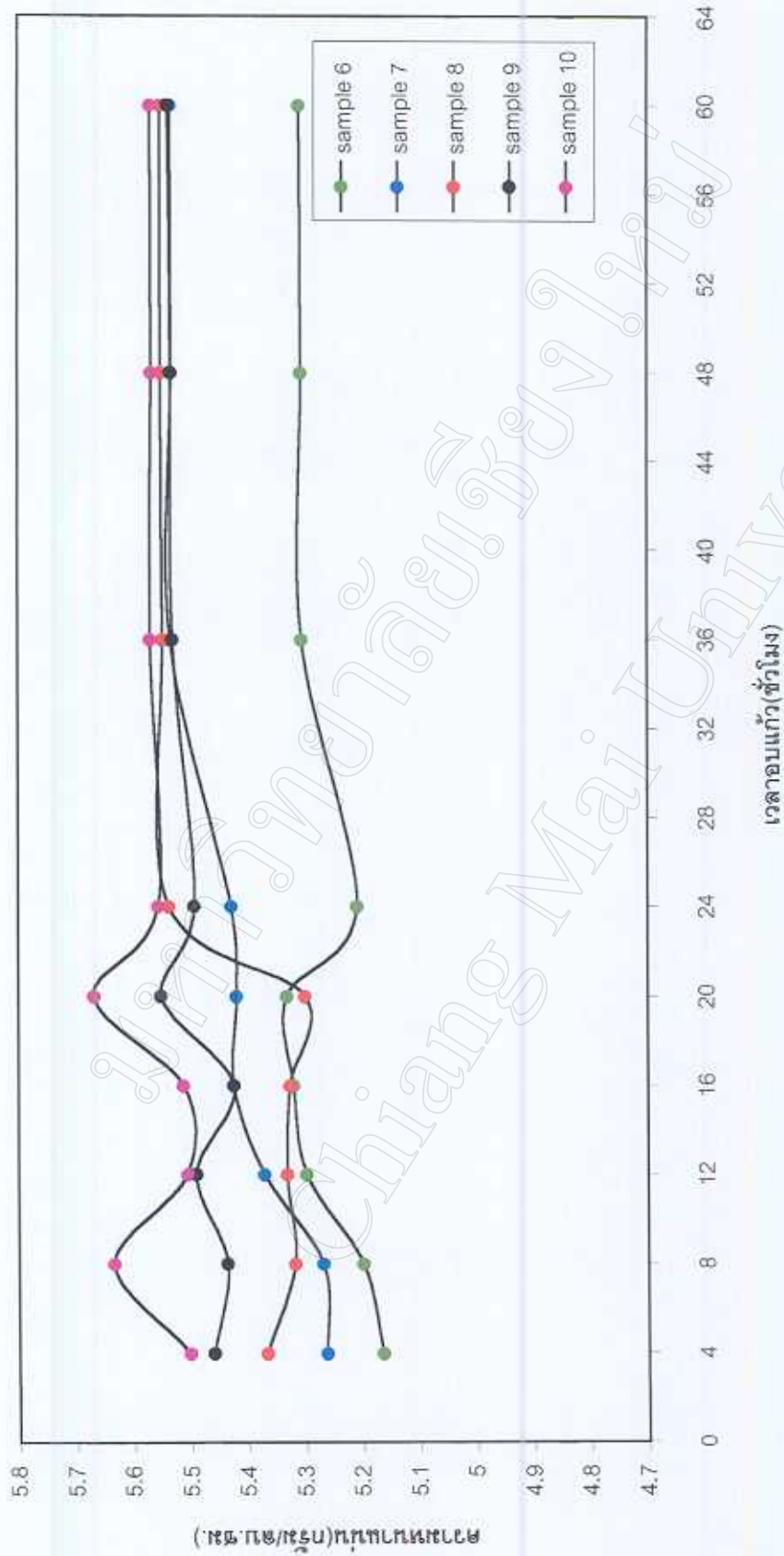
รูป 35 แสดงค่าดัชนีหักเหเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 275 °C



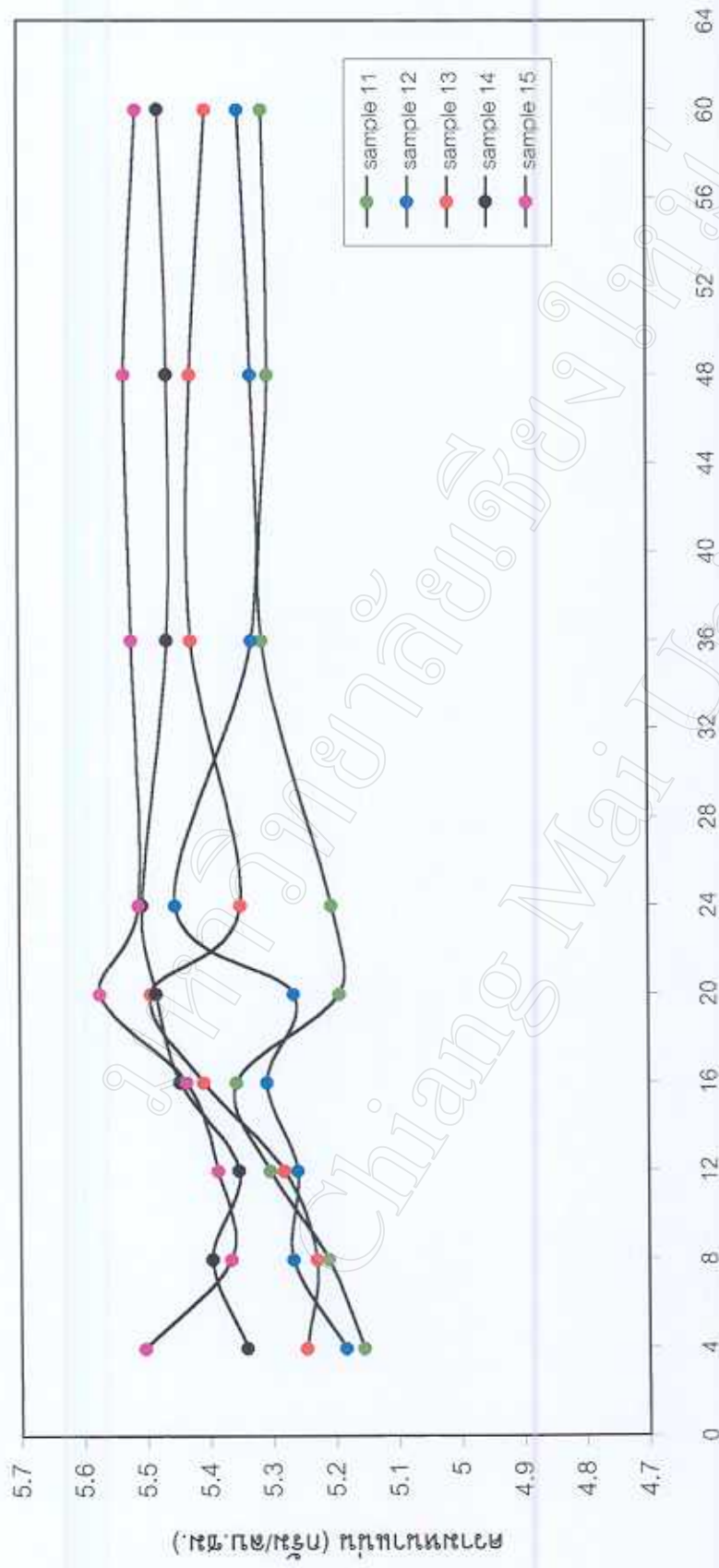
รูป 36 แสดงค่าความถี่ที่หักเหเฉลี่ยเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ



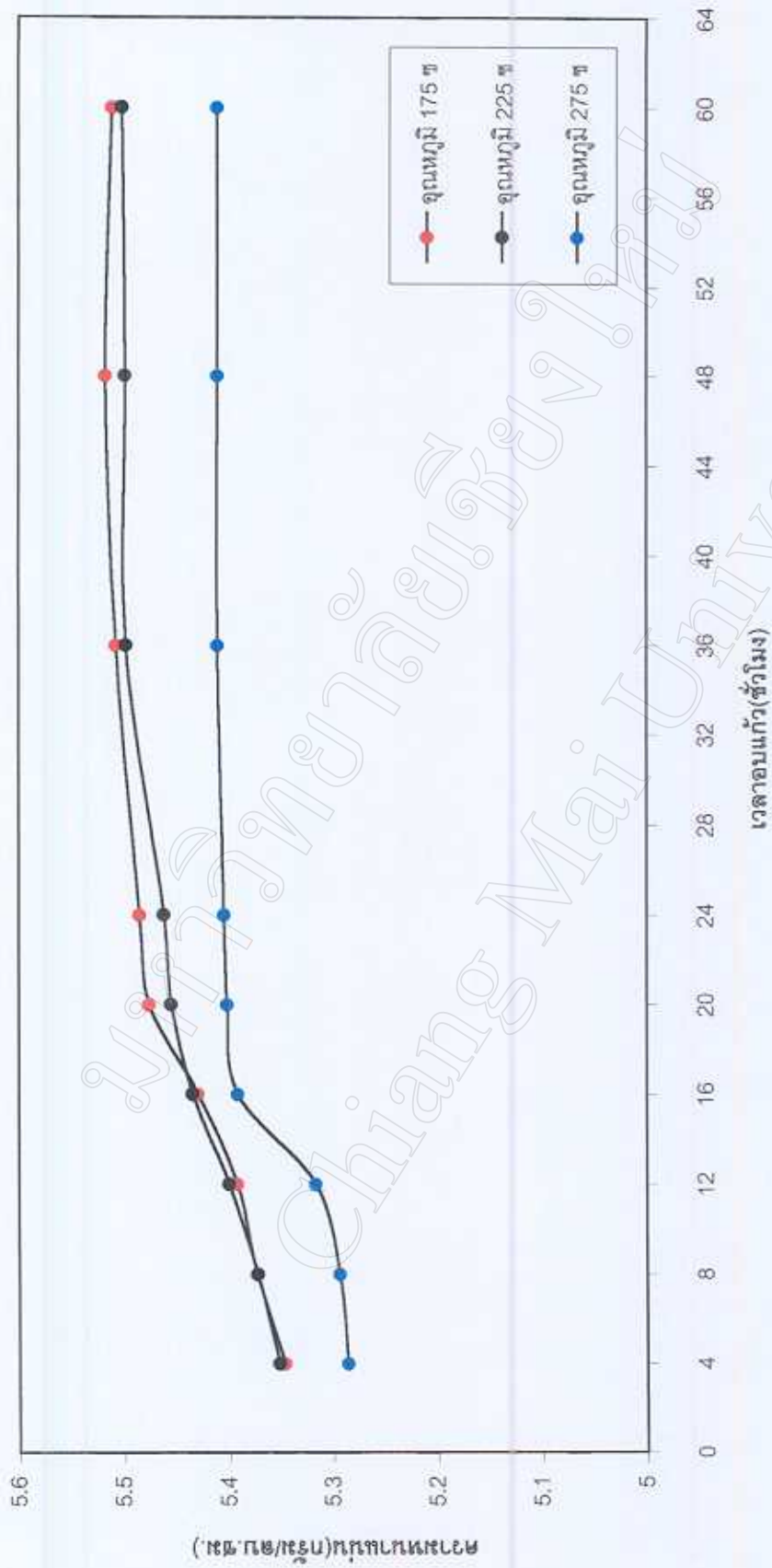
รูป 37 แสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 175°C



รูป 38 แสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับเวลาอบแก๊สที่อุณหภูมิ 225 °C



รูป 39 แสดงความหนาแน่นเทียบกับเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 275 °C



รูป 40 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่อบแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ

3.7 ผลการวัดค่าดัชนีหักเหและความหนาแน่นหลังลดอุณหภูมิด้วยอัตราต่างๆ

หลังจากที่ทราบอุณหภูมิ T_g ของแก้วที่มีค่าประมาณ 225°C และอุณหภูมิที่แก้วเริ่มเกิดการอ่อนตัวที่ประมาณ 330°C ดังนั้นอุณหภูมิในการทดลองประกอบไปด้วย 175 , 225 , 275 และ 325°C ส่วนอัตราการเย็นตัวของแก้วในแต่ละอุณหภูมิประกอบด้วย 5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 35 , 40 , 45 และ 50°C/นาท ทั้งนี้ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้ชิ้นทดสอบแก้วจำนวน 5 ชิ้น ที่มีค่าดัชนีหักเหและความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน

ผลการวัดได้แสดงดังตารางที่ 14 ถึง 21 พร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำข้อมูลจากตารางมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหและอัตราการเย็นตัว ดังกราฟรูปที่ 41 ถึง 44 และเขียนกราฟเฉลี่ยเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 45 ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการเย็นตัวแสดงดังรูปที่ 46 ถึง 49 และกราฟความหนาแน่นเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในกราฟรูปที่ 50

ตาราง 14 แสดงค่าดัชนีหักเหของชิ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ย

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 175°C

อัตราการเย็นตัว ($^{\circ}\text{C/นาท}$)	ชิ้นที่ 16	ชิ้นที่ 17	ชิ้นที่ 18	ชิ้นที่ 19	ชิ้นที่ 20	เฉลี่ย	S.D.
5	1.869	1.866	1.870	1.869	1.872	1.869	2.17×10^{-3}
10	1.864	1.863	1.866	1.865	1.868	1.865	1.94×10^{-3}
15	1.861	1.861	1.862	1.862	1.864	1.862	1.22×10^{-3}
20	1.856	1.855	1.854	1.854	1.856	1.855	1.00×10^{-4}
25	1.851	1.850	1.850	1.849	1.850	1.850	7.07×10^{-4}
30	1.846	1.844	1.845	1.842	1.846	1.845	1.73×10^{-3}
35	1.843	1.842	1.843	1.840	1.842	1.842	1.22×10^{-3}
40	1.839	1.838	1.841	1.840	1.843	1.840	1.94×10^{-3}
45	1.839	1.839	1.842	1.842	1.843	1.841	1.87×10^{-3}
50	1.840	1.838	1.842	1.843	1.843	1.841	2.18×10^{-3}

ตาราง 15 แสดงค่าความถี่หักเหของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ย

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 225 °ซ

อัตราการเย็นตัว (°ซ/นาท)	ชั้นที่ 21	ชั้นที่ 22	ชั้นที่ 23	ชั้นที่ 24	ชั้นที่ 25	เฉลี่ย	S.D.
5	1.869	1.868	1.862	1.864	1.866	1.866	2.87×10^{-3}
10	1.862	1.863	1.857	1.860	1.859	1.860	2.40×10^{-3}
15	1.857	1.859	1.854	1.857	1.853	1.856	5.45×10^{-3}
20	1.852	1.851	1.850	1.852	1.849	1.851	1.32×10^{-3}
25	1.848	1.847	1.845	1.849	1.847	1.847	1.50×10^{-3}
30	1.838	1.835	1.848	1.848	1.848	1.843	6.40×10^{-3}
35	1.839	1.830	1.843	1.847	1.847	1.841	7.45×10^{-3}
40	1.835	1.829	1.842	1.846	1.848	1.840	1.10×10^{-5}
45	1.833	1.830	1.843	1.847	1.848	1.840	8.23×10^{-3}
50	1.833	1.829	1.841	1.847	1.847	1.839	8.19×10^{-3}

ตาราง 16 แสดงค่าความถี่หักเหของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ย

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 275 °ซ

อัตราการเย็นตัว (°ซ/นาท)	ชั้นที่ 26	ชั้นที่ 27	ชั้นที่ 28	ชั้นที่ 29	ชั้นที่ 30	เฉลี่ย	S.D
5	1.862	1.864	1.865	1.862	1.867	1.867	3.97×10^{-3}
10	1.853	1.861	1.857	1.860	1.862	1.859	3.67×10^{-3}
15	1.846	1.856	1.852	1.857	1.860	1.854	5.41×10^{-3}
20	1.839	1.845	1.846	1.857	1.854	1.848	7.26×10^{-3}
25	1.835	1.843	1.839	1.850	1.850	1.843	6.67×10^{-3}
30	1.836	1.832	1.838	1.837	1.849	1.838	6.36×10^{-3}
35	1.833	1.831	1.836	1.833	1.847	1.836	6.40×10^{-3}
40	1.830	1.825	1.837	1.827	1.847	1.833	8.57×10^{-3}
45	1.830	1.825	1.838	1.827	1.848	1.834	9.46×10^{-3}
50	1.831	1.822	1.835	1.826	1.848	1.832	1.00×10^{-5}

ตาราง 17 แสดงค่าความถี่หักเหของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ย

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 325 °ซ

อัตราการเย็นตัว (°ซ/นาที)	ชั้นที่ 31	ชั้นที่ 32	ชั้นที่ 33	ชั้นที่ 34	ชั้นที่ 35	เฉลี่ย	S.D.
5	1.848	1.857	1.866	1.857	1.857	1.857	6.36×10^{-3}
10	1.847	1.858	1.860	1.858	1.850	1.855	5.74×10^{-3}
15	1.845	1.858	1.852	1.844	1.842	1.848	6.65×10^{-3}
20	1.840	1.852	1.848	1.841	1.832	1.843	7.07×10^{-3}
25	1.838	1.847	1.845	1.838	1.826	1.839	8.23×10^{-3}
30	1.833	1.847	1.836	1.836	1.826	1.836	7.58×10^{-3}
35	1.828	1.845	1.836	1.830	1.826	1.833	7.68×10^{-3}
40	1.828	1.846	1.830	1.824	1.825	1.831	8.94×10^{-3}
45	1.818	1.846	1.830	1.830	1.820	1.829	0.011
50	1.818	1.847	1.830	1.827	1.820	1.828	0.012

ตาราง 18 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ย

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 175 °ซ

อัตราการเย็นตัว (°ซ/นาที)	ชั้นที่ 21	ชั้นที่ 22	ชั้นที่ 23	ชั้นที่ 24	ชั้นที่ 25	เฉลี่ย	S.D.
5	5.3427	5.3412	5.3400	5.3410	5.3420	5.3414	1.03×10^{-3}
10	5.3387	5.3311	5.3307	5.3315	5.3300	5.3324	3.57×10^{-3}
15	5.3315	5.3282	5.3274	5.3285	5.3277	5.3287	1.65×10^{-3}
20	5.3251	5.3147	5.3364	5.3154	5.3211	5.3225	8.85×10^{-3}
25	5.3204	5.3112	5.3360	5.3148	5.3112	5.3187	0.010
30	5.3184	5.3096	5.3311	5.3100	5.3088	5.3156	9.51×10^{-3}
35	5.3141	5.3052	5.3250	5.3049	5.3030	5.3104	9.21×10^{-3}
40	5.2981	5.2989	5.3200	5.2991	5.2986	5.3029	9.55×10^{-3}
45	5.2927	5.2919	5.3182	5.2931	5.2924	5.2977	0.011
50	5.2900	5.289	5.3121	5.2905	5.2899	5.2943	9.98×10^{-3}

ตาราง 19 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ย

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 225 °ซ

อัตราการเย็นตัว (°ซ/นาที)	ชั้นที่ 21	ชั้นที่ 22	ชั้นที่ 23	ชั้นที่ 24	ชั้นที่ 25	เฉลี่ย	S.D.
5	5.3293	5.3600	5.3005	5.3299	5.3228	5.3285	0.021
10	5.3274	5.3589	5.2981	5.3278	5.3211	5.3267	0.022
15	5.3211	5.3521	5.2927	5.3221	5.3188	5.3214	0.021
20	5.3188	5.3489	5.2891	5.3189	5.3079	5.3167	0.022
25	5.3128	5.3429	5.2837	5.3128	5.3014	5.3107	0.014
30	5.3097	5.3399	5.2800	5.3092	5.2989	5.3075	0.022
35	5.3072	5.3374	5.2781	5.3027	5.2919	5.3035	0.022
40	5.3029	5.3323	5.2732	5.2990	5.2889	5.2993	0.022
45	5.3000	5.3308	5.2711	5.2969	5.2851	5.2969	0.023
50	5.2987	5.3288	5.2690	5.2911	5.2809	5.2937	0.023

ตาราง 20 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ย

เมื่อลดอุณหภูมิจาก 275 °ซ

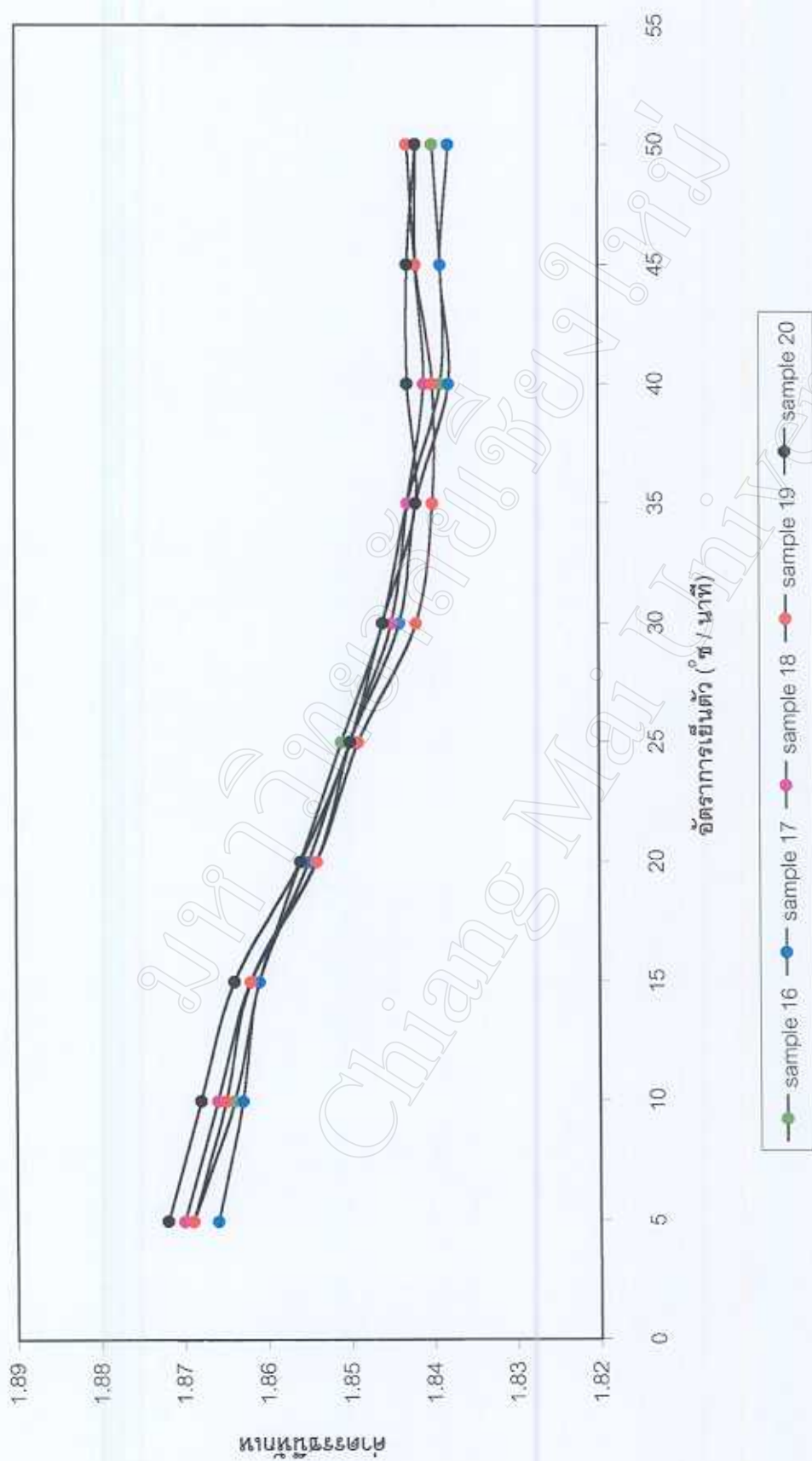
อัตราการเย็นตัว (°ซ/นาที)	ชั้นที่ 26	ชั้นที่ 27	ชั้นที่ 28	ชั้นที่ 29	ชั้นที่ 30	เฉลี่ย	S.D.
5	5.3261	5.3164	5.3212	5.3120	5.3127	5.3177	5.60×10^{-3}
10	5.3254	5.3117	5.3210	5.3111	5.3110	5.3160	6.72×10^{-3}
15	5.3222	5.3100	5.3197	5.3100	5.3097	5.3143	6.12×10^{-3}
20	5.3211	5.3074	5.3190	5.3077	5.3064	5.3123	7.11×10^{-3}
25	5.3190	5.3037	5.3144	5.3032	5.3011	5.3083	7.92×10^{-3}
30	5.3169	5.3000	5.3117	5.3009	5.2988	5.3057	5.90×10^{-3}
35	5.3138	5.2966	5.3085	5.2981	5.2944	5.3023	8.41×10^{-3}
40	5.3107	5.2903	5.3038	5.2922	5.2976	5.2989	8.42×10^{-3}
45	5.3082	5.2882	5.2997	5.2879	5.2919	5.2952	8.46×10^{-3}
50	5.3038	5.2819	5.2966	5.2807	5.2888	5.2904	9.84×10^{-3}

ตาราง 21 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ 5 ชั้นและค่าเฉลี่ย
เมื่อลดอุณหภูมิจาก 325 °ซ

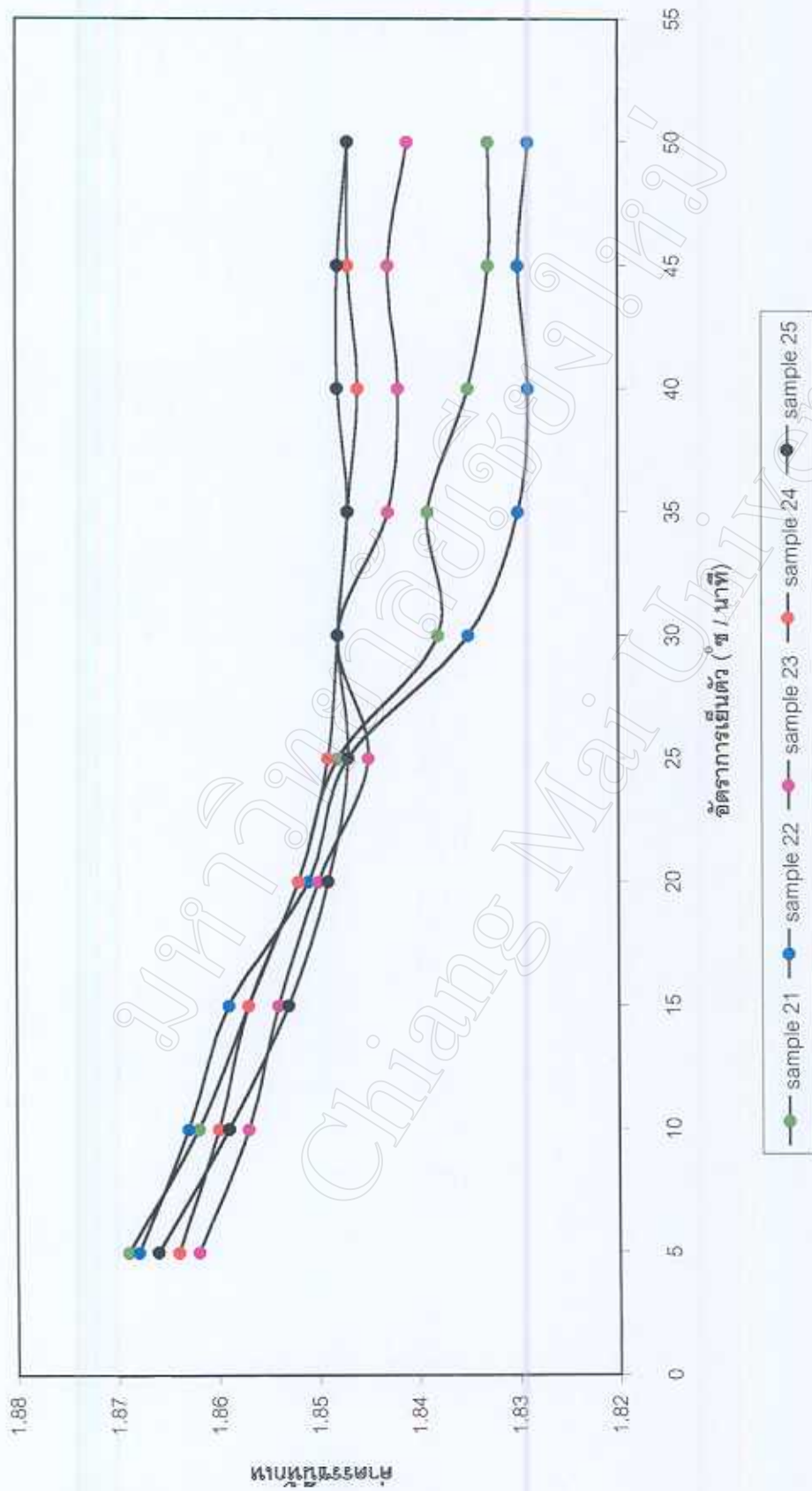
อัตราการเย็นตัว (°ซ/นาท)	ชั้นที่ 31	ชั้นที่ 32	ชั้นที่ 33	ชั้นที่ 34	ชั้นที่ 35	เฉลี่ย	S.D.
5	5.3445	5.2973	5.3343	5.2944	5.3151	5.3171	0.022
10	5.3436	5.2967	5.3339	5.2939	5.3147	5.3166	0.022
15	5.3400	5.2951	5.3321	5.2928	5.3124	5.3145	0.021
20	5.3379	5.2921	5.3300	5.2891	5.3101	5.3118	0.022
25	5.3347	5.2889	5.3284	5.2811	5.3071	5.3080	0.024
30	5.3299	5.2795	5.3184	5.2779	5.3007	5.3013	0.023
35	5.3197	5.2692	5.3008	5.2611	5.2915	5.2885	0.022
40	5.3110	5.2612	5.2984	5.2551	5.2872	5.2826	0.024
45	5.3066	5.2572	5.2911	5.2491	5.2810	5.2770	0.024
50	5.3017	5.2521	5.2877	5.2465	5.2781	5.2732	0.023

ในรูป 41 – 44 และ 46 - 49 แสดงค่าดรชนีหักเหและความหนาแน่นของชั้นทดสอบ 5 ชั้น เทียบกับอัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 175 , 225 , 275 และ 325 °ซ ตามลำดับ พบว่าลักษณะของกราฟที่ได้จากทั้ง 4 อุณหภูมิคล้ายกัน โดยช่วงแรกเส้นกราฟจะมีความสับสน แต่มีแนวโน้มที่จะให้ค่าดรชนีหักเหและความหนาแน่นต่ำลงตามอัตราการเย็นตัวที่เพิ่มขึ้น ส่วนช่วงท้ายนั้นเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

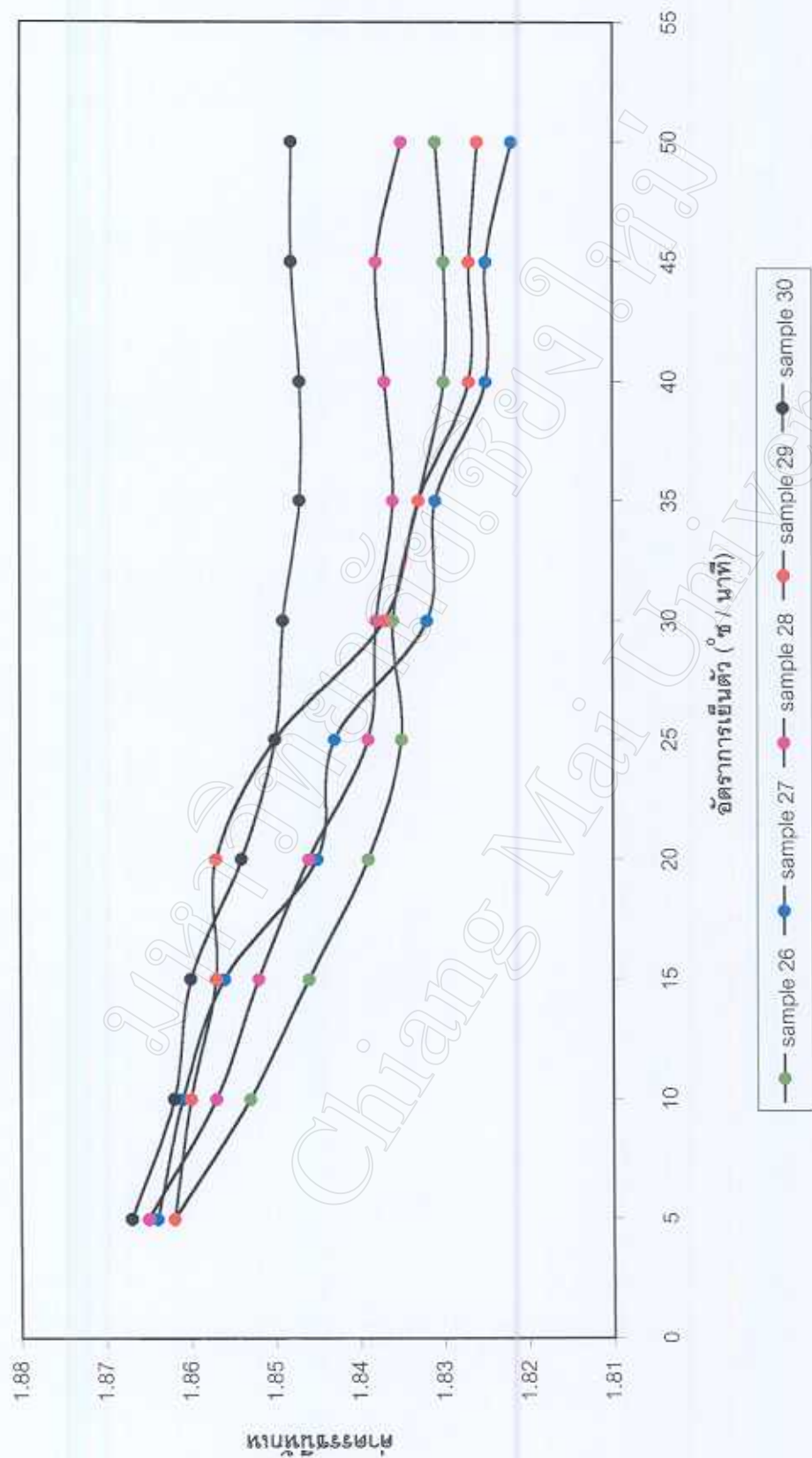
ในรูป 45 และ 50 แสดงค่าดรชนีหักเหและความหนาแน่นเฉลี่ยเทียบกับอัตราการเย็นตัวต่างๆ ของแต่ละอุณหภูมิ พบว่าลักษณะกราฟของแต่ละอุณหภูมิลำดับคล้ายกัน คือ จะมีค่าดรชนีหักเหและความหนาแน่นลดลงตามอัตราการเย็นตัวที่เพิ่มขึ้น และถ้าเปรียบเทียบค่าที่แต่ละอุณหภูมิจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าดรชนีหักเหและความหนาแน่นสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง



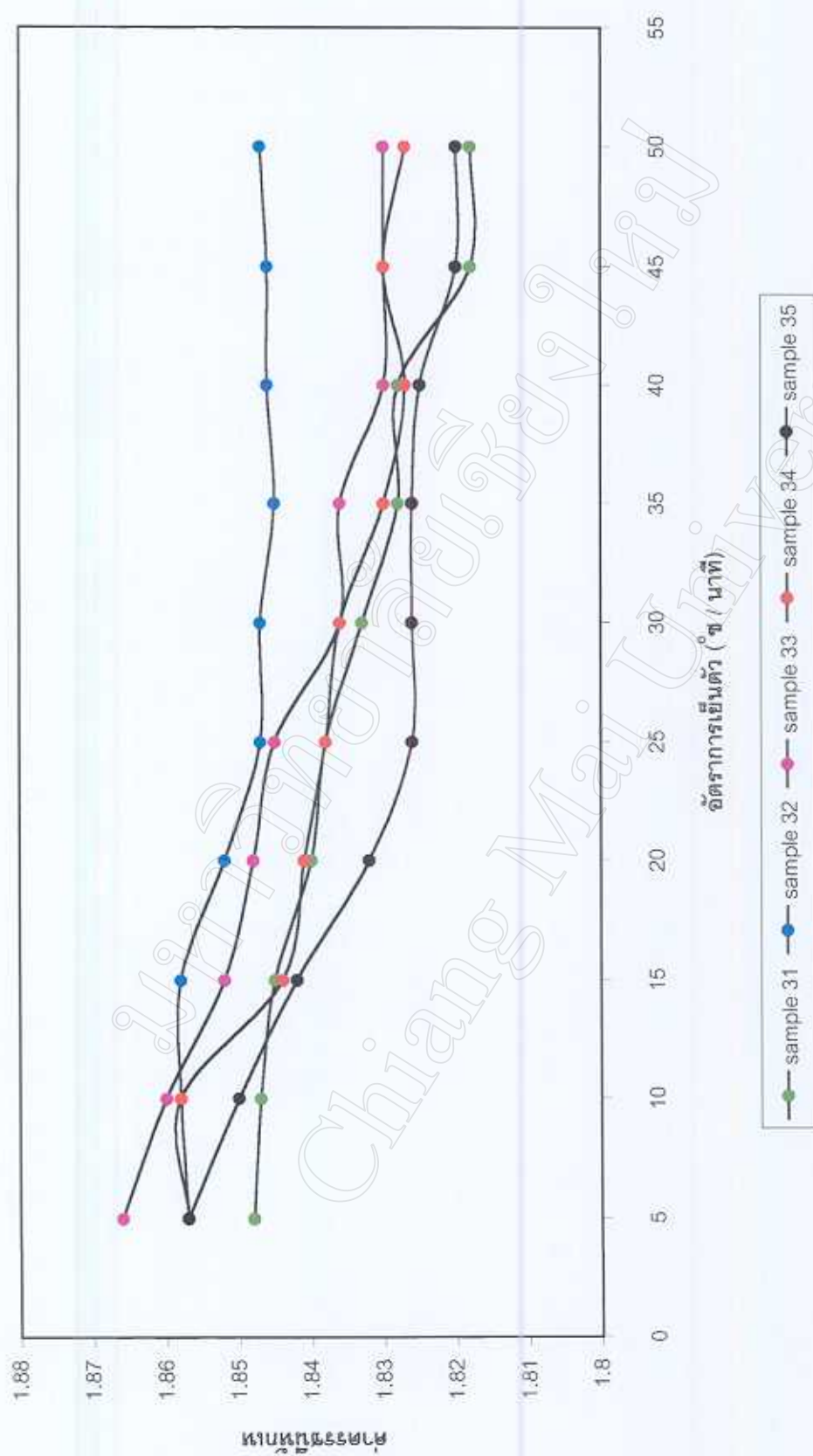
รูป 41 แสดงค่าดัชนีหักเหเทียบกับอัตราการเหินตัวที่อุณหภูมิ 175 °C



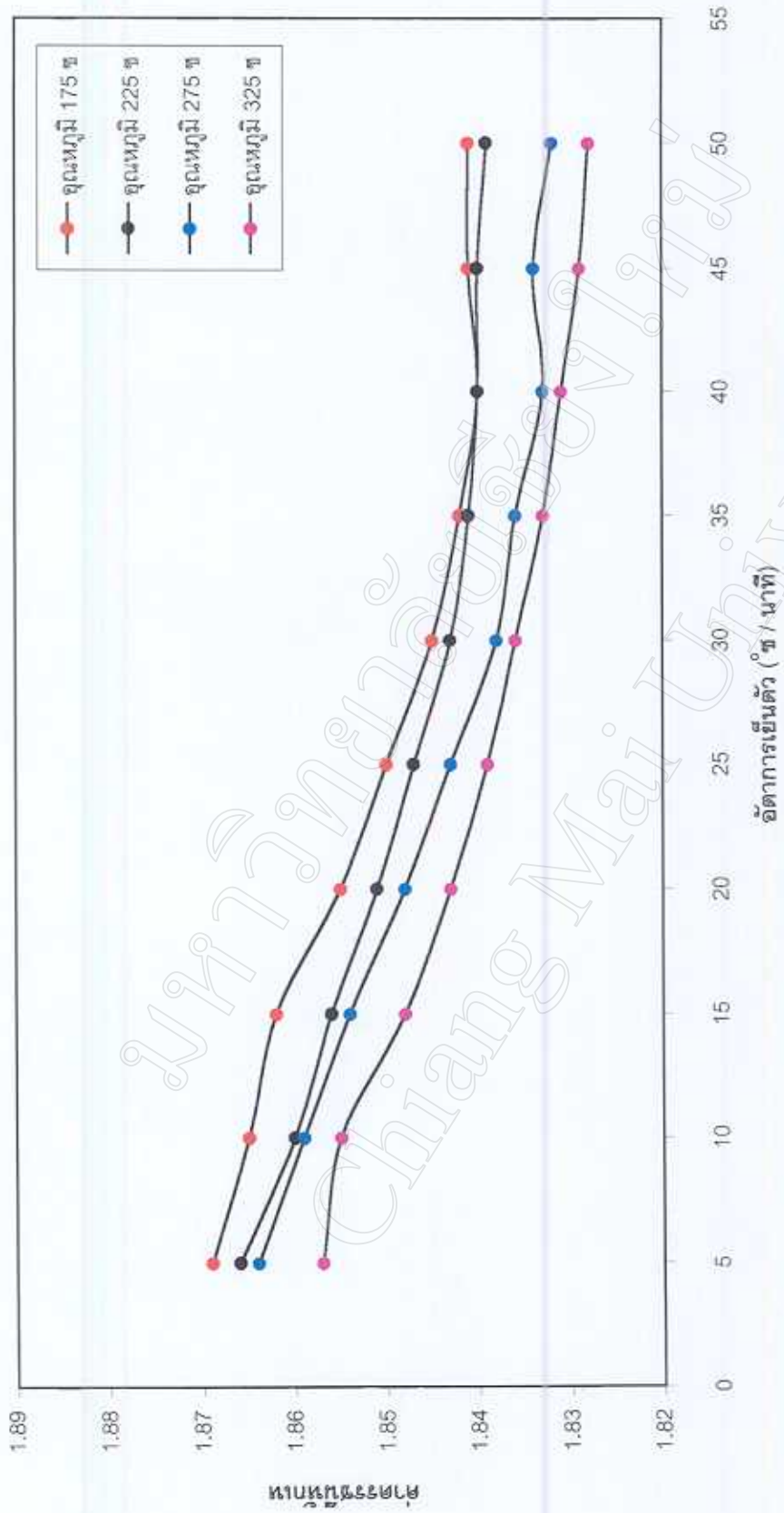
รูป 42 แสดงค่าดัชนีหักเหเทียบกับอัตราการเหินตัวที่อุณหภูมิ 225°C



รูป 43 แสดงค่าดัชนีหักเหเทียบกับอุณหภูมิที่จุดหมัก 275 °C



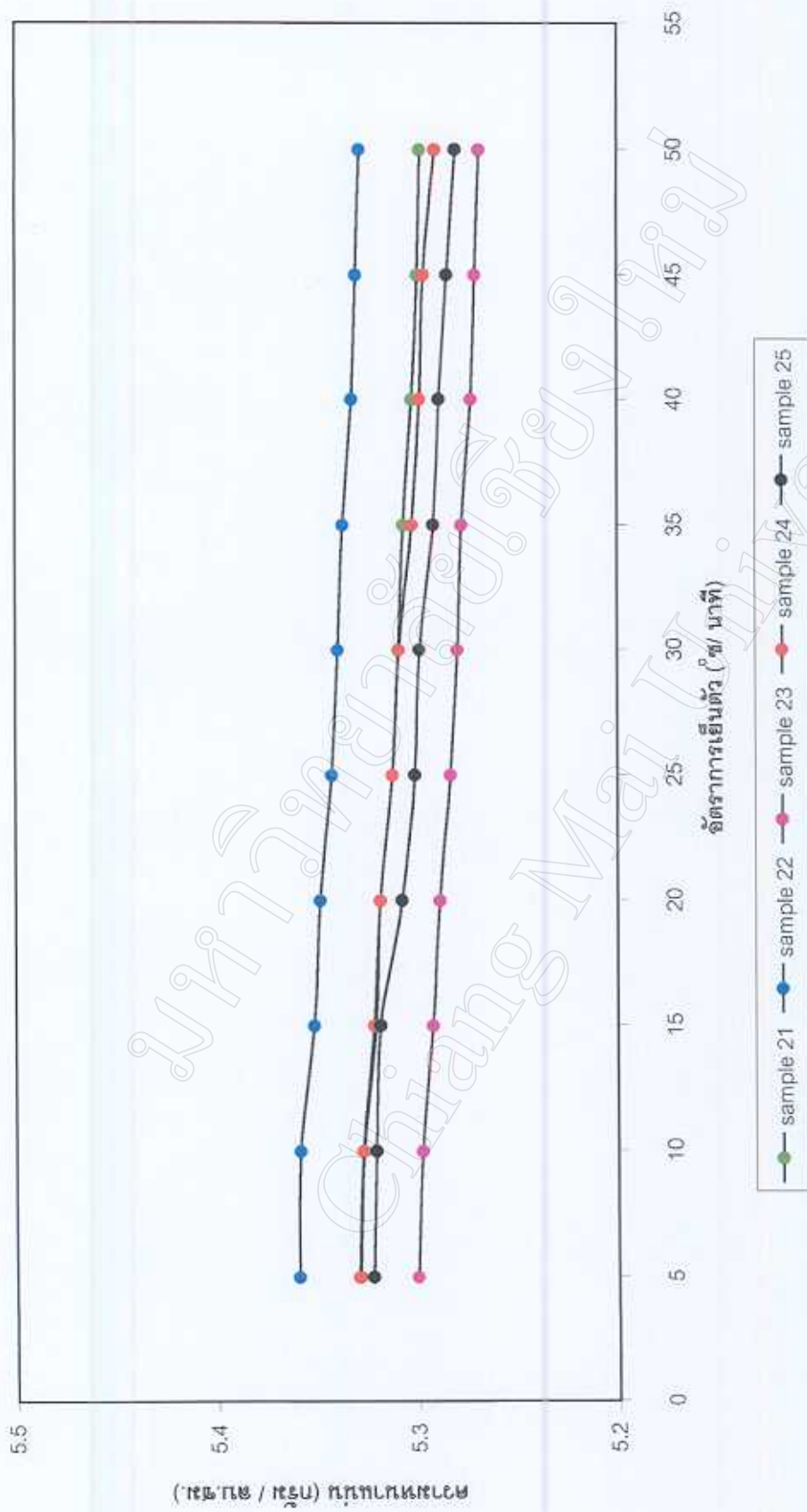
รูป 44 แสดงค่าดัชนีหักเหเทียบกับอัตราส่วนเข้มข้นที่มี 32.5%



รูป 45 แสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปกับการวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีค่าต่าง ๆ



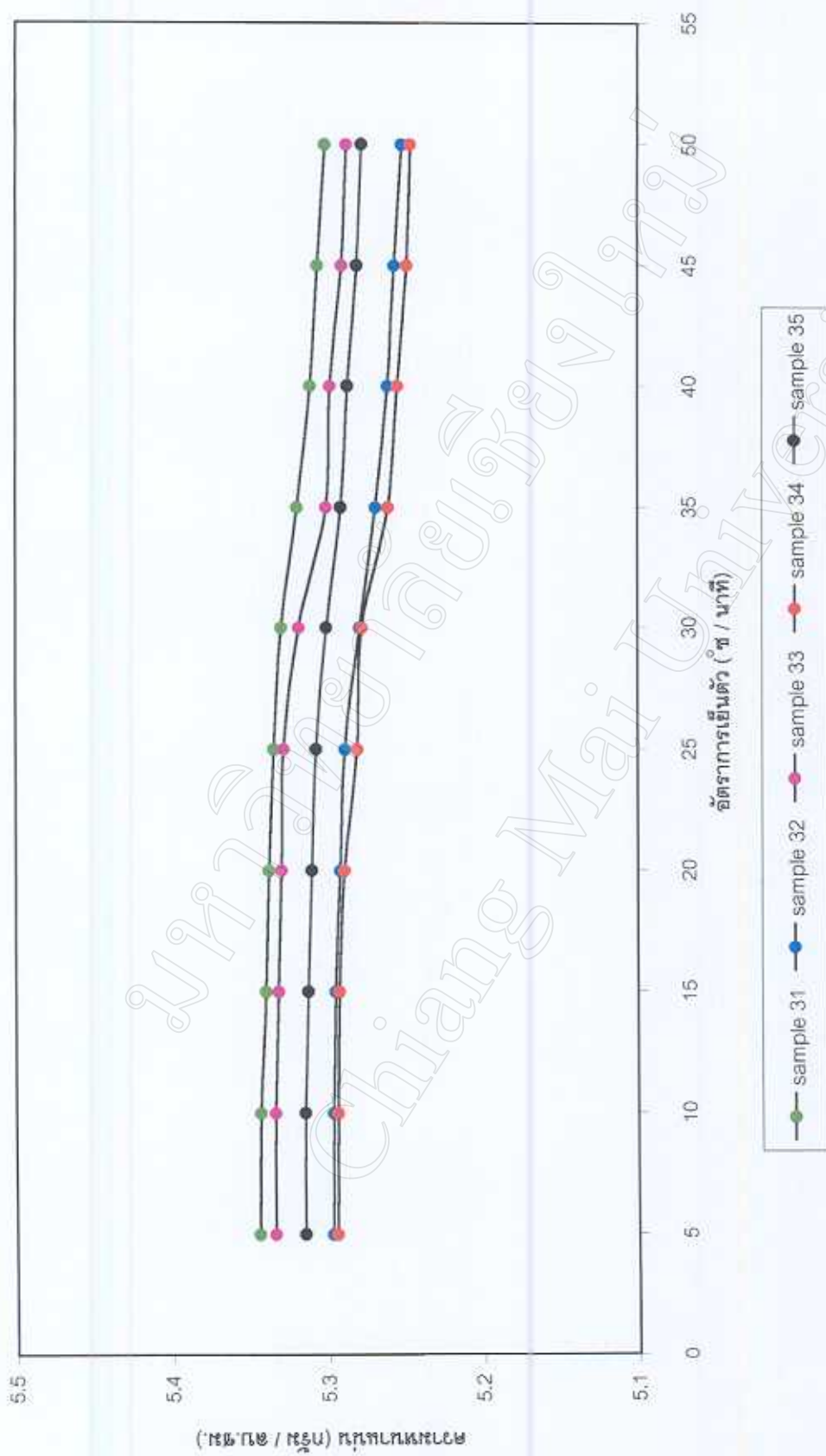
รูป 46 แสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 175 °C



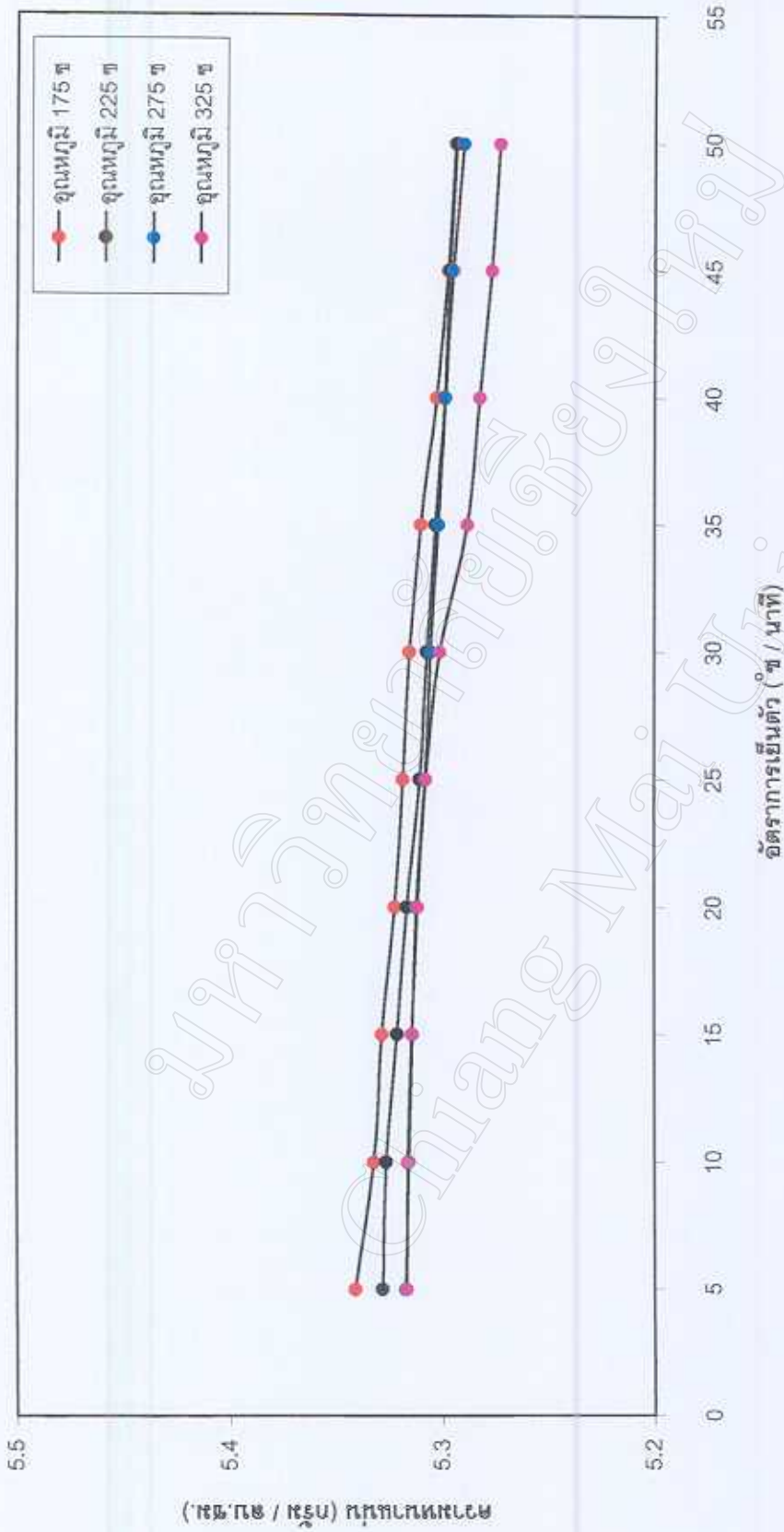
รูป 47 แสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเป็นตัวที่อุณหภูมิ 225 °ซ



รูปที่ 48 แสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 275 °C



รูป 49 แสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 325 °C



รูป 50 แสดงค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่เกี่ยวกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิต่างๆ