เอกสารอ้างอิง

คำพัน บัวละพัน, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมเกียรติ ปรัชญาวรากร และวารุณี เตีย. 2550. การพองของกล้วยโดยเทคนิคร่วมระหว่างอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1, 1-8.

ทวีชัย วงศ์ศักดิ์ไพโรจน์. 2543. การอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์.2549. สมบัติทางกายภาพของแครอทหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

พลสันต์ วงษ์ศรี. 2548. การอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศิวะ อัจฉริยวิริยะ. 2547. เทคโนโลยีการอบแห้งลำไย. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

สิริมา สุขพรรณ์. 2541. ผลของการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนต่อปริมาณบีตา-แคโรทีนในแครอท. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

อิศเรศ ธุชกัลยา. 2543. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 86 หน้า

อัศวิน ชินธรรมมิตร์. 2546. การพัฒนากรรมวิธีการอบแห้งแครอทและเนื้อไก่โดยอบแห้งแบบลมร้อนกับการใช้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 154 หน้า.

Arun, S. 2000. Handbook of Industrial Drying, S.EDI reviser and expanded V.2. Department of Chemical Engineering. McGill University. Montreal. Quebee. Canada.

Aghbashlo, M., Kianmehr, M. and Arabhosseini, A. 2008. Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer. Journal of Food Engineering. 91. pp. 99–108.

Carrot, http://www.orst.edu/Dept/NWREC/carrot.html/ Commercial Vegetable Guides, College of Agriculture Sciences, Oregon State University.

Caixeta, A.T., Moreira, R. and Castell-perez, M.E. 2001 Impingement drying of potato chips. Journal of Food Process Engineering. 25. pp. 63-90.

Mayer-Miebach, E., Behsnilian, D., Regier M. and Schuchmann, H.P. 2005. Thermal processing of carrots: Lycopene stability and isomerisation with regard to antioxidant potential. Food Research International. pp. 1103–1108.

Elustondo, D. M., Elustondo, M.J. and Urbicain, M. J. 2001 Mathematical modeling of moisture evaporation from foodstuffs exposed to subatmospheric pressure superheated steam. Journal of Food Engineering. 49. pp. 15-24.

Iyota, H., Nishimura, N., Yoshida, M. and Nomura, T. 2001, Simulation of Superheated Steam Drying Considering Initial Steam Condensation. Drying Technology. 19(7). pp. 1425-1440

Jamradloedluk, J., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2003. Drying of Durian Slices in Superheated Steam and Hot Air. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference. Thailand. pp. 667.

Kocabiyik, H. and Tezer, D. 2008. Drying of carrot slices using infrared radiation. International Journal of Food Science and Technology. 44. pp. 953–959.

Lavelli V., Zanoni B. and Zaniboni A. 2007. Effect of water activity on carotenoid degradation in dehydrated carrots. Food Chemistry. 104. pp. 1705–1711.

Lorenz, A.O., and D.N. Maynard. 1980. Composition of the edible portions of fresh, raw vegetables Knott's Handbook for Vegetable Growers. 2nd. Edition, Wiley Interscience Publication. NewYork. pp 22-29.

Li, Y.B., Seyed-Yagoobi, Y.B., Moreira, G.R. and Yamasaengsung, R. 1999 Superheated steam impingement drying of tortilla chips. Drying Technology. 17(1&2). pp. 191-213.

Phoungchadang, S. and Woods, J.L. 2000. Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. Journal of Food Science. 65(4). pp. 651-657.

Stephane, A., Flavia, M. and Theodore, P. 1998. Preservation of carotene from carrots. Reviews in Food Science and Nutrition. pp. 381-396.

Srikiatden, J. and John S. Roberts. 2005. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. Journal of Food Engineering. 74. pp. 143–152.

Schwartze, J.P. and Brocker, S. 2000. The evaporation of water into air of different humidities and the inversion temperature phenomenon. International Journal of Heat & Mass Transfer. 43(10). pp. 1971-1800.

Sheikholeslami, R. and Watkinson, A.P. 1992, On the rate of evaporation of water into a stream of dry air, humidified air and superheated steam, and the inversion temperature. International Journal of Heat & Mass Transfer. 35(7). pp. 1743-1751.

Tarnawaki, W.Z., Mitera, J., Borowski, P. and Klepaczka, A., 1996, Energy analysis on use of air and superheated steam as drying media. Drying Technology. 14(7&8). pp. 1733-1749.

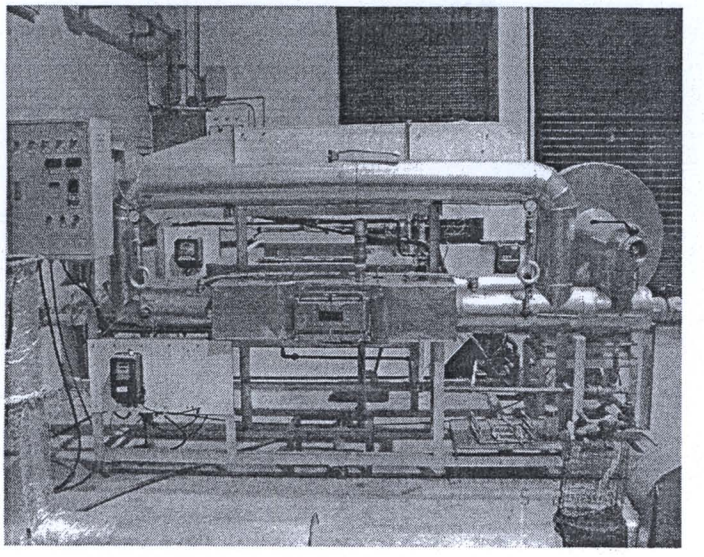
Westerman, P.W., White, G.M. and Ross, I.J. 1973. Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. Transactions of the ASAE. 16. pp. 1136-1139.

Yoshida, T. and Hyodo, T. 1970. Evaporation of water in air, humid air and superheated steam. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. 9(2). pp. 207-214.

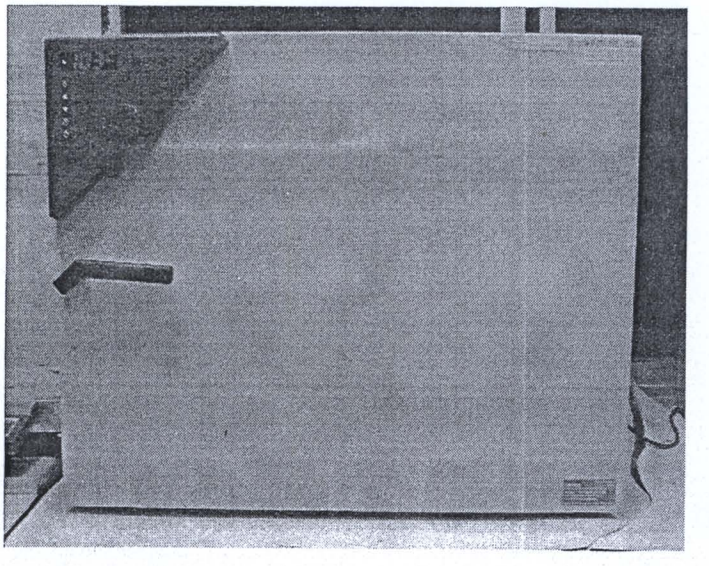
Brown, Z.K., Fryer, P.J., Norton, I.T., Bakalis, S. and Bridson, R.H. 2007. Drying of foods using supercritical carbon dioxide - Investigations with carrot. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 9. pp. 280–289.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

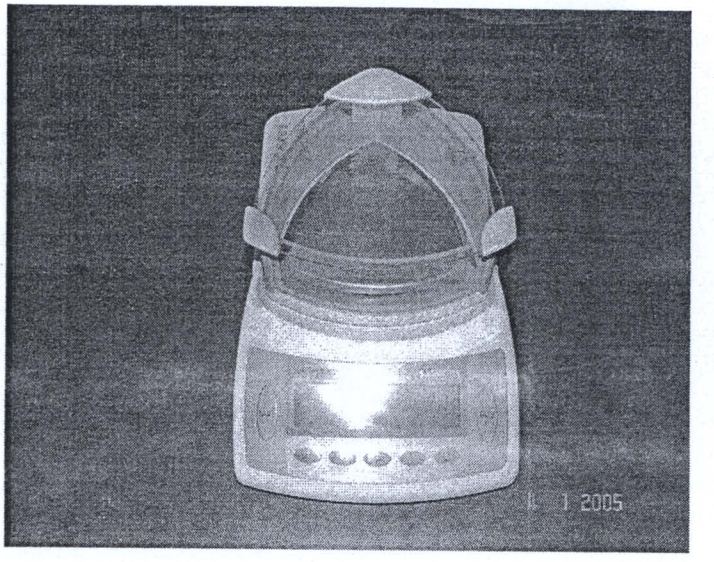


รูป ก.1 เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

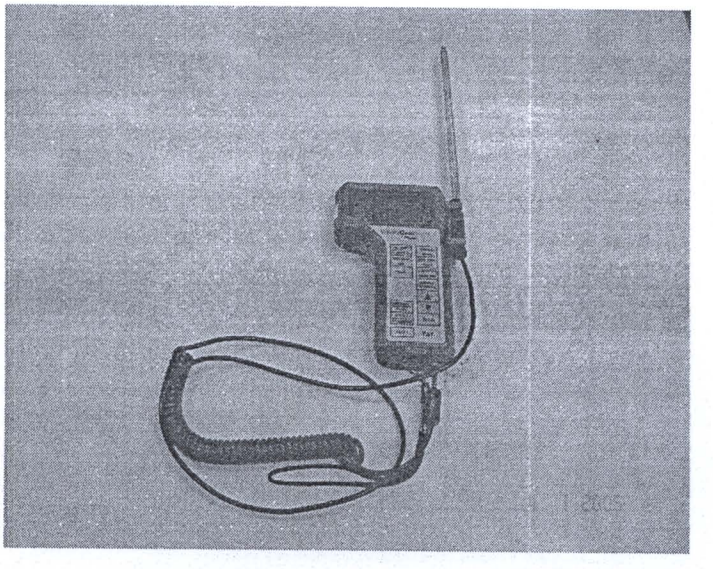


รูป ก.2 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ WBT Binder

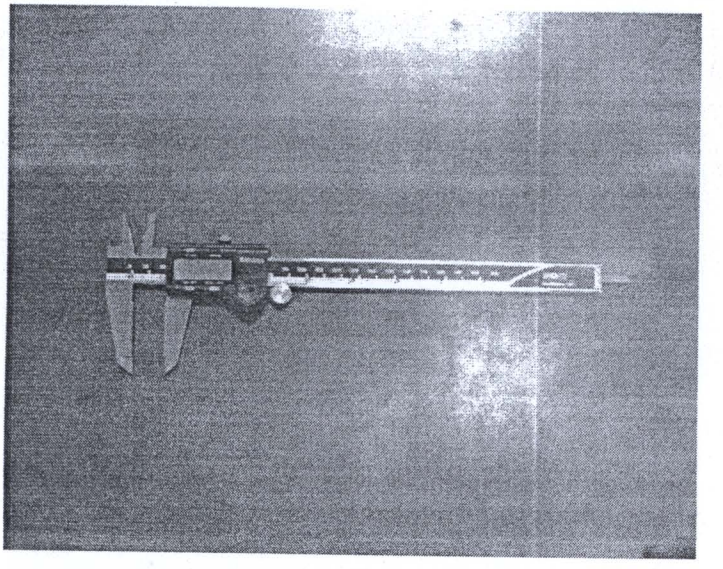
รุ่น BD/ED/FD with R3-Controller



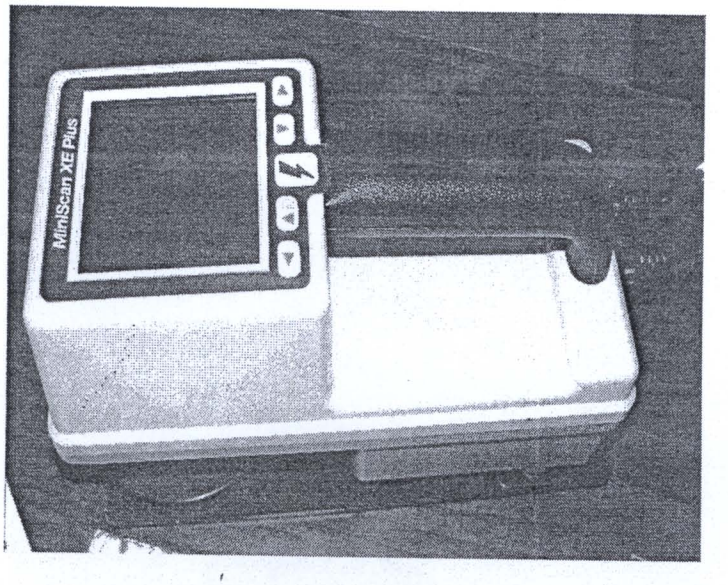
รูป ก.3 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CR323S



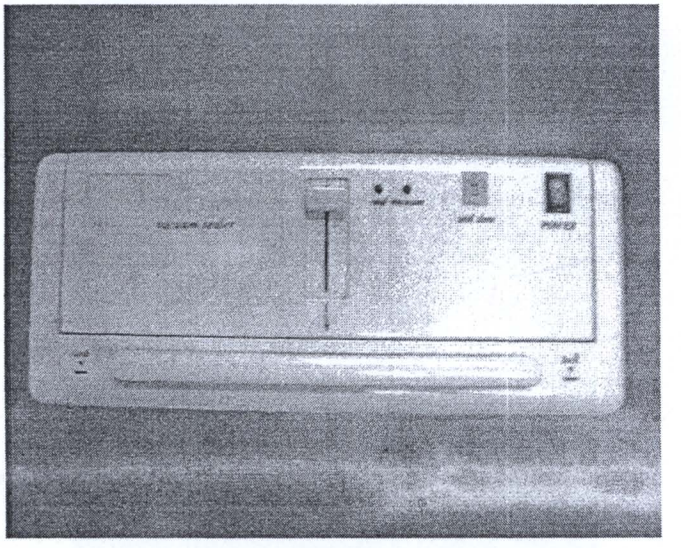
รูป ก.4 อุปกรณ์วัดความเร็วลมและความดัน ยี่ห้อ TSI รุ่น 8385-M-GB



รูป ก.5 เวอร์เนียร์

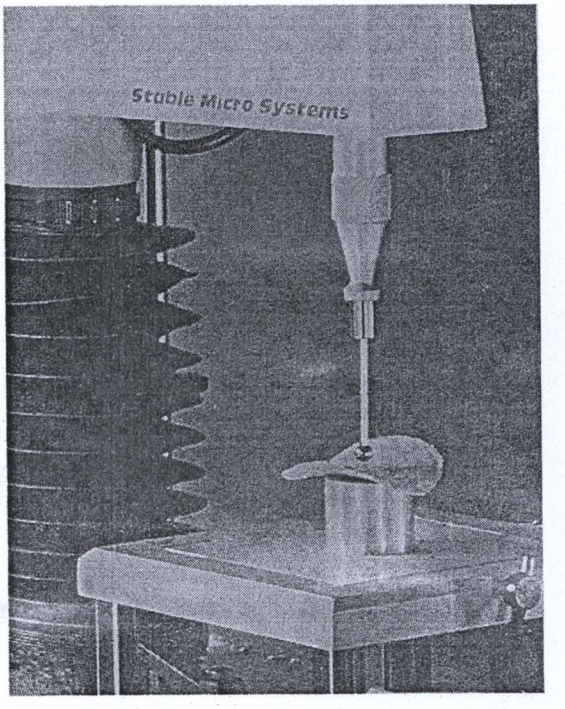


รูป ก.6 เครื่องวัดสี Miniscan XE plus

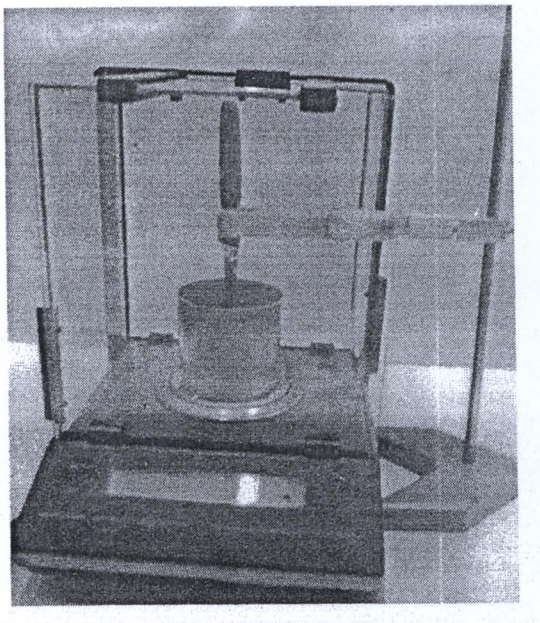


รูป ก.7 เครื่องดูดอากาศและเครื่องผนึกถุง

รูป ก.8 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Kane-May รุ่น KM330 (Type K)



รูป ก.9 เครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2*i*/50 Texture Technologies, US)



รูป ก.10 การจัดอุปกรณ์วัดปริมาตรของวัสดุ

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการอบแห้ง

ตาราง ข.1 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.945	26.945	1.885	1051.342	1.00
15.00	26.732	21.111	1.942	776.947	0.74
30.00	26.023	17.065	2.017	550.928	0.52
45.00	25.958	13.692	1.910	362.505	0.34
60.00	26.332	11.340	1.940	231.117	0.22
75.00	26.392	9.748	2.013	142.185	0.14
90.00	25.260	8.102	1.909	50.236	0.05
110.00	25.417	7.558	1.939	18.729	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.632	26.632	1.790	1048.375	1.00
15.00	27.452	21.366	1.847	729.401	0.70
30.00	26.023	16.436	1.922	516.469	0.49
45.00	26.476	12.912	1.815	330.909	0.32
60.00	27.408	10.225	1.845	216.221	0.21
75.00	27.146	8.692	1.918	125.404	0.12
90.00	27.201	7.762	1.814	47.752	0.05
110.00	26.520	7.552	1.844	18.038	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.101	27.101	1.824	1067.930	1.00
15.00	26.372	20.932	1.881	773.741	0.72
30.00	26.023	16.918	1.956	503.455	0.47
45.00	25.699	13.420	1.849	310.253	0.29
60.00	25.794	11.258	1.879	202.939	0.20
75.00	26.015	9.546	1.952	118.893	0.19
90.00	25.2895	8.233	1.848	47.406	0.04
110.00	25.8655	7.554	1.878	18.428	0.02

ตาราง ข.2 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.196	26.196	1.905	1008.642	1.00
15.00	26.353	20.276	1.840	694.602	0.69
30.00	25.836	15.364	1.885	434.033	0.43
45.00	26.543	11.933	1.853	252.028	0.25
60.00	25.937	9.755	1.818	166.490	0.16
75.00	25.658	8.551	1.838	112.621	0.11
90.00	25.819	7.739	1.764	39.547	0.03
100.00	26.196	7.550	1.816	18.029	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.803	26.803	1.844	1071.82	1.00
15.00	26.960	19.548	1.779	674.070	0.63
30.00	26.443	15.003	1.824	424.892	0.40
45.00	25.974	12.271	1.792	275.111	0.26
60.00	26.544	10.204	1.757	161.788	0.15
75.00	26.265	9.327	1.777	113.707	0.11
90.00	26.426	8.021	1.703	42.106	0.04
100.00	25.443	7.548	1.755	17.625	0.01

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	25.741	25.741	1.810	1035.589	1.00
15.00	25.898	20.468	1.745	741.027	0.72
30.00	25.381	15.188	1.790	446.075	0.43
45.00	26.288	12.188	1.758	278.489	0.27
60.00	25.482	10.182	1.723	166.429	0.16
75.00	25.203	9.181	1.743	110.511	0.11
90.00	25.364	7.982	1.669	43.532	0.04
100.00	26.392	7.554	1.721	18.055	0.02

ตาราง ข.3 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.667	26.667	1.863	1033.628	1.00
15.00	26.511	20.774	1.937	721.020	0.70
30.00	27.027	16.451	1.885	491.696	0.48
45.00	25.432	12.947	1.922	305.818	0.30
60.00	26.926	10.280	1.962	164.340	0.16
75.00	27.205	8.454	1.939	67.476	0.07
90.00	27.044	7.545	1.964	19.256	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	25.964	25.964	1.768	1025.825	1.00
15.00	25.808	20.442	1.842	723.083	0.70
30.00	26.324	15.660	1.790	460.911	0.45
45.00	26.775	12.015	1.827	261.075	0.25
60.00	27.223	9.132	1.867	103.016	0.10
75.00	26.502	7.736	1.844	26.481	0.03
90.00	26.341	7.575	1.869	17.654	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.623	26.623	1.802	1084.859	1.00
15.00	26.467	21.737	1.875	811.916	0.75
30.00	26.983	16.125	1.824	498.418	0.46
45.00	25.865	13.087	1.861	328.709	0.30
60.00	26.882	10.607	1.901	190.170	0.18
75.00	27.161	8.448	1.878	69.564	0.06
90.00	27.000	7.528	1.903	18.171	0.02

ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.408	27.408	1.769	1072.936	1.00
15.00	27.565	19.502	1.838	653.543	0.61
30.00	27.048	14.918	1.790	410.374	0.38
45.00	26.985	11.028	1.825	204.020	0.19
60.00	27.149	8.959	1.862	94.265	0.09
75.00	26.870	7.864	1.840	36.178	0.03
80.00	27.031	7.532	1.864	18.566	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.648	27.648	1.803	1118.150	1.00
15.00	27.805	20.772	1.872	741.175	0.66
30.00	26.288	15.642	1.824	459.925	0.41
45.00	26.334	11.522	1.859	234.047	0.21
60.00	27.389	9.138	1.896	103.345	0.09
75.00	26.190	8.210	1.874	52.467	0.05
80.00	27.271	7.544	1.898	15.954	0.01

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.146	27.146	1.864	1114.075	1.00
15.00	26.303	20.573	1.933	746.893	0.67
30.00	26.786	16.656	1.885	528.081	0.47
45.00	27.146	12.702	1.920	307.202	0.28
60.00	25.887	9.451	1.957	125.594	0.11
75.00	26.608	8.688	1.935	82.971	0.07
80.00	26.769	7.536	1.959	18.618	0.02

ตาราง ข.5 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.316	27.316	1.771	1068.055	1.00
15.00	27.473	20.276	1.833	694.602	0.65
30.00	26.956	14.920	1.745	410.480	0.38
45.00	26.340	11.476	1.750	227.785	0.21
60.00	27.057	9.176	1.737	105.776	0.10
70.00	26.252	7.543	1.836	19.150	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.888	26.888	1.713	1076.483	1.00
15.00	27.045	19.548	1.855	674.070	0.63
30.00	26.528	14.650	1.715	405.539	0.38
45.00	25.494	11.086	1.883	210.143	0.20
60.00	26.629	8.690	1.853	78.783	0.07
70.00	25.855	7.553	1.752	16.448	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.458	26.458	1.889	1075.642	1.00
15.00	26.615	19.468	1.749	685.165	0.64
30.00	27.098	14.720	1.917	419.932	0.39
45.00	25.323	11.291	1.886	228.380	0.21
60.00	26.199	8.720	1.785	84.759	0.08
70.00	25.335	7.521	1.889	17.780	0.02

ตาราง ข.6 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	25.961	25.961	1.713	996.176	1.00
15.00	26.118	19.556	1.947	656.408	0.66
30.00	25.601	12.356	1.770	274.467	0.28
45.00	25.161	8.350	1.827	61.959	0.06
55.00	25.202	7.468	1.808	15.171	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.664	27.664	1.805	1119.027	1.00
15.00	27.821	20.479	1.867	725.112	0.65
30.00	27.304	12.571	1.778	291.558	0.26
45.00	26.864	8.540	1.784	70.560	0.06
55.00	26.905	7.576	1.770	17.709	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.400	27.400	1.737	1128.264	1.00
15.00	27.557	19.207	1.836	670.585	0.59
30.00	27.040	11.871	1.738	260.780	0.23
45.00	26.600	8.310	1.855	61.855	0.05
55.00	26.641	7.540	1.833	18.841	0.02

ตาราง ข.7 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.520	26.520	1.854	1025.830	1.00
15.00	26.677	18.322	1.717	590.947	0.58
30.00	26.160	12.630	1.882	289.002	0.28
45.00	25.720	9.015	1.851	97.235	0.09
60.00	25.761	7.487	1.752	16.179	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.123	27.123	1.888	1089.367	1.00
15.00	27.280	19.036	1.751	646.000	0.59
30.00	26.763	13.165	1.915	324.124	0.30
45.00	26.323	9.279	1.885	111.075	0.10
60.00	26.364	7.571	1.786	17.434	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.201	27.201	1.858	1117.147	1.00
15.00	27.358	19.635	1.946	694.494	0.62
30.00	26.841	13.409	1.772	346.696	0.31
45.00	26.401	9.585	1.828	133.079	0.12
60.00	26.442	7.523	1.810	17.892	0.02

ตาราง ข.8 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.343	27.343	1.767	1069.488	1.00
15.00	27.500	17.834	1.844	565.060	0.53
30.00	26.983	11.189	1.707	212.560	0.20
45.00	26.543	8.302	1.740	59.413	0.06
50.00	26.584	7.532	1.723	18.566	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.033	27.033	1.800	1084.433	1.00
15.00	27.190	18.602	1.878	622.206	0.57
30.00	26.673	12.191	1.741	270.725	0.25
45.00	26.233	8.032	1.774	42.709	0.04
50.00	26.274	7.567	1.757	17.215	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.463	26.463	1.862	1075.921	1.00
15.00	26.620	18.005	1.939	603.439	0.56
30.00	26.103	12.320	1.802	285.862	0.27
45.00	25.663	8.062	1.835	48.001	0.04
50.00	25.704	7.527	1.818	18.115	0.02

ตาราง ข.9 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.479	27.479	1.839	1076.702	1.00
15.00	27.636	13.476	1.734	333.880	0.31
30.00	27.119	9.021	1.860	97.554	0.09
45.00	26.679	7.544	1.837	19.203	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.823	26.823	1.873	1072.920	1.00
15.00	26.980	14.304	1.768	386.569	0.36
30.00	26.463	8.649	1.894	76.536	0.07
45.00	26.023	7.580	1.871	17.928	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.039	27.039	1.804	1108.098	1.00
15.00	27.196	14.474	1.871	406.189	0.37
30.00	26.679	9.055	1.752	103.472	0.09
45.00	26.239	7.529	1.781	18.227	0.02

ตาราง ข.10 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	25.396	25.396	1.872	966.204	1.00
15.00	25.553	14.530	1.845	389.792	0.40
30.00	25.036	7.516	1.756	17.717	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	25.260	25.260	1.834	987.229	1.00
15.00	25.417	15.470	1.817	450.495	0.46
30.00	25.900	7.583	1.943	18.092	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	25.417	25.417	1.800	1017.489	1.00
15.00	25.574	15.140	1.879	443.394	0.44
30.00	25.057	7.524	1.739	17.947	0.02

ตาราง ข.11 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.252	26.252	1.851	1011.613	1.00
15.00	26.409	14.022	1.831	362.844	0.36
27.00	25.892	7.510	1.765	17.399	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.469	26.469	1.885	1053.512	1.00
15.00	26.626	14.149	1.865	378.071	0.36
27.00	26.109	7.577	1.799	17.763	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.093	27.093	1.865	1111.114	1.00
15.00	27.250	14.717	1.761	419.764	0.38
27.00	26.733	7.517	1.786	17.556	0.02

ตาราง ข.12 ข้อมูลการทดลองและผลการหาอัตราส่วนความชื้นของแครอทที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s

ครั้งที่ 1

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.003	26.003	1.837	998.404	1.00
15.00	26.160	10.015	1.718	150.283	0.15
20.00	25.643	7.477	1.747	15.649	0.02

ครั้งที่ 2

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	27.410	27.410	1.871	1105.102	1.00
15.00	27.000	11.848	1.751	251.920	0.23
20.00	26.483	7.574	1.780	17.599	0.02

ครั้งที่ 3

Drying time (min)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)	มวลแห้งแครอทแผ่น (g)	ความชื้น (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น
0.00	26.843	26.843	1.873	1097.149	1.00
15.00	27.567	11.024	1.768	213.465	0.19
20.00	27.050	7.537	1.894	18.674	0.02

ภาคผนวก ค

ผลการคำนวนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม และค่าคงที่การอบแห้ง

ตาราง ค.1 ผลการคำนวนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมของการอบแห้งแครอทแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2, 3 และ 4 m/s

Drying condition (°C, m/s)	D (m^2/min)					
	ครั้งที่ 1*	ครั้งที่ 2*	ครั้งที่ 3*	Model 1	Model 2	Model 3
120, 2 m/s	4.58E-09[a]	5.33E-09[a]	4.88E-09[a]	2.96E-09	3.84E-09	4.23E-09
120, 3 m/s	5.79E-09[b]	5.86E-09[b]	5.43E-09[b]	3.57E-09	4.63E-09	4.23E-09
120, 4 m/s	5.28E-09[a,b]	5.82E-09[a,b]	5.14E-09[ab]	5.43E-09	7.02E-09	4.23E-09
140, 2 m/s	6.84E-09[a]	6.33E-09[a]	5.62E-09[a]	5.19E-09	4.81E-09	7.23E-09
140, 3 m/s	6.40E-09[a]	6.74E-09[a]	6.54E-09[a]	6.26E-09	5.80E-09	7.23E-09
140, 4 m/s	8.17E-09[b]	8.07E-09[b]	9.08E-09[b]	9.53E-09	8.79E-09	7.23E-09
160, 2 m/s	8.34E-09[a]	8.03E-09[a]	6.94E-09[a]	8.65E-09	8.21E-09	1.18E-08
160, 3 m/s	1.00E-08[b]	9.31E-09[b]	9.24E-09[b]	1.04E-08	9.90E-09	1.18E-08
160, 4 m/s	1.5E-08[c]	1.46E-08[c]	1.4E-08[c]	1.59E-08	1.50E-08	1.18E-08
180, 2 m/s	1.42E-08[a]	1.29E-08[a]	1.34E-08[a]	1.38E-08	1.40E-08	1.83E-08
180, 3 m/s	1.80E-08[a]	1.61E-08[a]	1.56E-08[a]	1.66E-08	1.69E-08	1.83E-08
180, 4 m/s	2.93E-08[b]	2.42E-08[b]	2.61E-08[b]	2.53E-08	2.57E-08	1.83E-08

หมายเหตุ * หมายถึง เป็นการทดลองซ้ำในเงื่อนไขการทดลองที่เหมือนกัน

ตาราง ค.2 ผลการคำนวนค่าคงที่การอบแห้งของการอบแห้งแครอทแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2, 3 และ 4 m/s

Drying condition (°C, m/s)	k (min^{-1})				
	ครั้งที่ 1*	ครั้งที่ 2*	ครั้งที่ 3*	Model 4	Model 5
120, 2 m/s	0.0262	0.0282	0.0246	0.0271	0.0290
120, 3 m/s	0.0305	0.0312	0.0288	0.0307	0.0290
120, 4 m/s	0.0282	0.0307	0.0275	0.0292	0.0290
140, 2 m/s	0.0359	0.0333	0.0298	0.0307	0.0355
140, 3 m/s	0.0340	0.0357	0.0347	0.0333	0.0355
140, 4 m/s	0.0425	0.0421	0.0469	0.0426	0.0355
160, 2 m/s	0.0438	0.0422	0.0401	0.0444	0.0569
160, 3 m/s	0.0517	0.0483	0.0477	0.0507	0.0569
160, 4 m/s	0.0770	0.0742	0.0715	0.0755	0.0569
180, 2 m/s	0.0722	0.0664	0.0686	0.0683	0.0931
180, 3 m/s	0.0899	0.0814	0.0789	0.0829	0.0931
180, 4 m/s	0.1407	0.1181	0.1264	0.1280	0.0931

หมายเหตุ * หมายถึง เป็นการทดลองซ้ำในเงื่อนไขการทดลองที่เหมือนกัน

ภาคผนวก ง

ค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแครอทแผ่นจากการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตาราง ง.1 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.74	0.68	0.64	0.62	0.67	0.65
30.00	0.52	0.55	0.49	0.47	0.44	0.42
45.00	0.34	0.45	0.38	0.35	0.30	0.27
60.00	0.22	0.37	0.29	0.27	0.20	0.18
75.00	0.14	0.31	0.23	0.20	0.13	0.11
90.00	0.05	0.25	0.18	0.15	0.09	0.07
110.00	0.02	0.19	0.13	0.11	0.05	0.04

ตาราง ง.2 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.69	0.65	0.60	0.62	0.63	0.65
30.00	0.43	0.51	0.44	0.47	0.40	0.42
45.00	0.25	0.40	0.32	0.35	0.25	0.27
60.00	0.16	0.32	0.24	0.27	0.16	0.18
75.00	0.11	0.25	0.18	0.20	0.10	0.11
90.00	0.03	0.20	0.13	0.15	0.06	0.07
100.00	0.02	0.17	0.11	0.13	0.05	0.05

ตาราง ง.3 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.70	0.57	0.51	0.62	0.64	0.65
30.00	0.48	0.40	0.32	0.47	0.42	0.42
45.00	0.30	0.28	0.20	0.35	0.27	0.27
60.00	0.16	0.19	0.13	0.27	0.17	0.18
75.00	0.07	0.14	0.08	0.20	0.11	0.11
90.00	0.02	0.09	0.05	0.15	0.07	0.07

ตาราง ง.4 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.61	0.58	0.60	0.50	0.63	0.59
30.00	0.38	0.41	0.43	0.31	0.40	0.34
45.00	0.19	0.29	0.31	0.19	0.25	0.20
60.00	0.09	0.21	0.23	0.12	0.16	0.12
75.00	0.03	0.15	0.17	0.08	0.10	0.07
80.00	0.02	0.13	0.15	0.06	0.09	0.06

ตาราง ง.5 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.65	0.54	0.56	0.50	0.61	0.59
30.00	0.38	0.36	0.38	0.31	0.37	0.34
45.00	0.21	0.24	0.26	0.19	0.22	0.20
60.00	0.10	0.16	0.18	0.12	0.14	0.12
70.00	0.02	0.12	0.14	0.09	0.10	0.08

ตาราง ง.6 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.66	0.43	0.45	0.50	0.53	0.59
30.00	0.27	0.23	0.25	0.31	0.28	0.34
45.00	0.08	0.12	0.14	0.19	0.15	0.20
55.00	0.02	0.08	0.10	0.14	0.10	0.14

ตาราง ง.7 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.59	0.46	0.47	0.37	0.51	0.43
30.00	0.30	0.26	0.28	0.17	0.26	0.18
45.00	0.10	0.15	0.16	0.08	0.14	0.08
60.00	0.02	0.08	0.09	0.04	0.07	0.03

ตาราง ง.8 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.53	0.41	0.42	0.37	0.47	0.43
30.00	0.20	0.21	0.22	0.17	0.22	0.18
45.00	0.06	0.10	0.11	0.08	0.10	0.08
50.00	0.02	0.08	0.09	0.06	0.08	0.06

ตาราง ง.9 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.37	0.29	0.30	0.37	0.32	0.43
30.00	0.09	0.10	0.11	0.17	0.10	0.18
45.00	0.02	0.04	0.04	0.08	0.03	0.08

ตาราง ง.10 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.40	0.33	0.32	0.24	0.36	0.25
30.00	0.02	0.13	0.13	0.07	0.13	0.06

ตาราง ง.11 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.38	0.27	0.27	0.24	0.29	0.25
27.00	0.02	0.11	0.11	0.09	0.11	0.08

ตาราง ง.12 อัตราส่วนความชื้นของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s (จากผลการทดลองและแบบจำลอง)

Drying time (min)	อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า D)				อัตราส่วนความชื้น (คำนวณจากค่า k)	
	Experiment	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
0.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1	1
15.00	0.19	0.15	0.15	0.24	0.15	0.25
20.00	0.02	0.09	0.09	0.16	0.08	0.16

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลองการหาปริมาตรของวัสดุหลังอบแห้ง

ตาราง จ.1 ข้อมูลการทดลองการหาปริมาตรของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็ว 2 m/s

ผลต่างมวลที่วัดได้ก่อนอบแห้ง $(m_s\text{-}m_n)_0 = 2.448 \pm 0.181$ กรัม

ครั้งที่วัด	$(m_s\text{-}m_n)_f$, g				% Shrinkage			
	180°C	160°C	140°C	120°C	180°C	160°C	140°C	120°C
1	1.122	0.349	0.300	0.187	54.17	85.75	87.75	92.36
2	1.058	0.373	0.243	0.225	56.79	84.76	90.07	90.81
3	0.959	0.455	0.240	0.195	60.83	81.42	90.20	92.04
4	0.964	0.274	0.235	0.198	60.63	88.81	90.40	91.91
5	0.886	0.478	0.239	0.192	63.81	80.48	90.24	92.16
6	0.984	0.382	0.247	0.205	59.81	84.40	89.91	91.63
7	0.865	0.473	0.250	0.193	64.67	80.68	89.79	92.12
8	1.078	0.384	0.266	0.210	55.97	84.32	89.14	91.42
9	1.049	0.428	0.227	0.217	57.15	82.52	90.73	91.14
10	1.154	0.372	0.253	0.185	52.87	84.81	89.67	92.44
	Mean				58.67	83.79	89.79	91.80
	SD				3.93	2.57	0.84	0.54

ตาราง จ.2 ข้อมูลการทดลองการหาปริมาตรของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็ว 3 m/s

ผลต่างมวลที่วัดได้ก่อนอบแห้ง $(m_s\text{-}m_n)_0 =$ 2.448 ± 0.181 กรัม

ครั้งที่วัด	$(m_s\text{-}m_n)_f$, g				% Shrinkage			
	180°C	160°C	140°C	120°C	180°C	160°C	140°C	120°C
1	1.265	0.504	0.268	0.232	48.33	79.41	89.05	90.52
2	1.356	0.531	0.326	0.269	44.61	78.31	86.68	89.01
3	1.139	0.430	0.243	0.234	53.48	82.44	90.07	90.44
4	1.137	0.417	0.357	0.224	53.56	82.97	85.42	90.85
5	1.304	0.431	0.257	0.150	46.74	82.40	89.50	93.87
6	1.059	0.406	0.289	0.223	56.75	83.42	88.20	90.89
7	1.123	0.642	0.321	0.198	54.13	73.78	86.89	91.91
8	1.258	0.531	0.421	0.263	48.62	78.31	82.80	89.26
9	1.087	0.577	0.487	0.187	55.60	76.43	80.11	92.36
10	1.257	0.489	0.276	0.148	48.66	80.03	88.73	93.95
	Mean				51.05	79.75	86.75	91.31
	SD				4.13	3.15	3.19	1.71

ตาราง จ.3 ข้อมูลการทดลองการหาปริมาตรของแครอทแผ่นที่ทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็ว 4 m/s

ผลต่างมวลที่วัดได้ก่อนอบแห้ง $(m_s-m_n)_0 = 2.448 \pm 0.181$ กรัม

ครั้งที่วัด	$(m_s-m_n)_f$, g				% Shrinkage			
	180°C	160°C	140°C	120°C	180°C	160°C	140°C	120°C
1	1.442	0.559	0.283	0.242	41.10	77.17	88.44	90.12
2	1.322	0.642	0.316	0.264	46.00	73.78	87.09	89.22
3	1.159	0.489	0.534	0.257	52.66	80.03	78.19	89.50
4	1.154	0.406	0.324	0.225	52.87	83.42	86.77	90.81
5	1.256	0.569	0.266	0.198	48.70	76.76	89.14	91.91
6	1.106	0.551	0.287	0.202	54.83	77.49	88.28	91.75
7	1.105	0.557	0.268	0.197	54.87	77.25	89.05	91.95
8	1.392	0.481	0.390	0.218	43.14	80.35	84.07	91.10
9	1.132	0.570	0.531	0.193	53.76	76.72	78.31	92.12
10	1.358	0.458	0.269	0.232	44.53	81.29	89.01	90.52
	Mean				49.25	78.43	85.84	90.90
	SD				5.21	2.80	4.28	1.05

ภาคผนวก ฉ

- การคำนวณความชื้นวัสดุ
- การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด
- การวิเคราะห์ความแปรปรวน
- ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าความชื้นของวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับมวลวัสดุชื้นหรือวัสดุแห้ง การหาค่าความชื้นของวัสดุโดยการชั่งน้ำหนักของวัสดุ แล้วนำไปใส่ตู้อบ Oven ที่อุณหภูมิประมาณ 103°C ประมาณ 72 h แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง โดยน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านการอบที่อุณหภูมินี้มาแล้วถือว่าเป็นน้ำหนักแห้ง จากนั้นก็สามารถนำไปคำนวณหาค่าความชื้นได้ตามสมการ

ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_W = \frac{(w-d)}{w} \tag{1}$$

หรือความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \tag{2}$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, % d.b.

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, % d.b.

w คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg

d คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ, kg

2. การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square)

ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์มีหลายวิธีและวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด และขอยกตัวอย่างโดยการพิจารณาสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$y = a + bx \tag{3}$$

โดยที่จำนวนข้อมูลเท่ากับ m ค่า คือ $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\ldots(x_m,y_m)$ ค่าผลรวม S จะอยู่ในรูปดังนี้

$$S = \sum_{i=m}^{m} (yi - a - bxi)^2 \quad \rightarrow \quad \text{Minimum} \tag{4}$$

เมื่อ S คือ ผลรวมของค่ายกกำลังสองของค่าแตกต่าง ซึ่งค่าที่น้อยที่สุดของ s เกิดขึ้น เมื่อทำการอนุพันธ์ย่อย $\frac{\partial S}{\partial a} = 0$ และ $\frac{\partial S}{\partial a} = 0$ ดังนี้

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{m} (y_i - a - bx_i)^2}{\partial a} = \sum_{i=1}^{m} 2(a + bx_i - y_i) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{m} (y_i - a - bx_i)^2}{\partial b} = \sum_{i=1}^{m} 2(a + bx_i - y_i)x_i = 0 \tag{6}$$

จากการจัดสมการใหม่จะได้

$$ma + b\sum x_i = \sum y_i \tag{7}$$

$$a\sum x_i + b\sum x^2{}_i = \sum x_i y_i \tag{8}$$

ซึ่งเมื่อทำการแทนค่าผลรวมของค่าตัวแปรอิสระ $\sum x_i$, $\sum x^2{}_i$ และค่าตัวแปรจริงที่ต้องการ $\sum x_i$ และ $\sum x^2{}_i$ จะสามารถหาค่าคงที่ a และ b เพื่อแทนลงในสมการ $y = a + bx$ สมการดังกล่าวจะสามารถแทนค่าของข้อมูล ซึ่งให้ค่าความแตกต่างจากข้อมูลจริงน้อยที่สุด ดังนี้

$$S = \sum_{i=1}^{m} R^2 = \sum_{i=m}^{m} (y_1 - y_i)^2 \quad \rightarrow \quad \text{Minimum} \tag{9}$$

โดยที่ R^2 คือ ค่าความแตกต่างของค่าที่ได้จากสมการ y_1 เทียบกับค่าที่ได้จากข้อมูล y_i

หมายเหตุ : ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Statistica เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์

3. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Analysis)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) เป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะแบ่งตัวแปรออกเป็นตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม และในการวิเคราะห์ทางสถิติเบื้องต้น ตัวแปรตามจะมี 1 ตัว ตัวแปรอิสระอาจจะมี 1 ตัว หรือมากกว่าก็ได้ และเรียกการวิเคราะห์นี้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way-ANOVA) แต่ถ้าตัวแปรอิสระมีมากกว่า 1 ตัว จะเรียกชื่อตามจำนวนตัวแปรอิสระ เช่น ตัวแปรอิสระ 2 ตัว เรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way-ANOVA)

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนมักนำค่าสถิติต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณมาสรุปไว้ในรูปของตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนดังนี้

แหล่งความแปรปรวน	df	SS	MS	F	P
ระหว่างกลุ่ม (B)	k-1	SSB	MSB=SSB/(k-1)	MSB/M	
ภายในกลุ่ม (W)	n-k	SSW	MSW=SSW/(n-k)	SW	
รวม (T)	n-1	SST			

เมื่อ df คือ ระดับขั้นความเสรี

SS คือ ผลรวมกำลังสอง

MS คือ ค่ากำลังสองเฉลี่ย

F คือ ค่าสถิติ F หรือ $F_{คำนวณ}$

P คือ ความน่าจะเป็นของค่าสถิติ F

K คือ จำนวนกลุ่ม

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

MSB คือ ผลรวมกำลังสองเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม

SS คือ ผลรวมกำลังสองเฉลี่ยภายในกลุ่ม

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังนี้

1) ระดับข้อมูล
2) สมมติฐาน
3) ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบ
4) ระดับนัยสำคัญ
5) การตัดสินใจ
6) การแปลผล

หมายเหตุ : ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดปรแกรม SPSS เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way-ANOVA)

4. ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ (D_{eff}) ตามรูปแบบสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎีมีขั้นตอน ดังนี้

1. ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ ข้อมูลการลดลงของความชื้น อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Time	Product weight (g)			M_d (d.b)		
	1	2	3	1	2	3
0.00	21.648	21.303	20.610	10.484	10.679	10.513
15.00	15.635	15.937	15.698	7.234	7.737	7.769
30.00	11.621	11.007	11.652	5.165	5.035	5.509
45.00	8.123	7.483	8.279	3.309	3.103	3.625
60.00	5.961	4.796	5.927	2.162	1.629	2.311
75.00	4.249	3.263	4.335	1.254	0.789	1.422
90.00	2.936	2.333	2.689	0.558	0.279	0.502
110.00	2.357	1.923	2.125	0.250	0.054	0.187

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d) คำนวณจากสมการ

$$M_d = \frac{(w-d)}{d}$$

2. นำข้อมูลการลดลงของความชื้นมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น จากสมการ (2.12)

โดยสมมุติค่า $M_{eq} = 0$

$$\overline{MR} = \frac{\overline{M} - M_{eq}}{\overline{M}_{in} - M_{eq}}$$

เมื่อ $\overline{M}$ คือ ความชื้นเฉลี่ย, % มาตรฐานแห้ง

Time	MR		
0.00	1	1	1
15.00	0.695744	0.724524	0.739005
30.00	0.492638	0.471431	0.524024
45.00	0.31564	0.290518	0.344803
60.00	0.206244	0.152575	0.219831
75.00	0.119617	0.109811	0.135241
90.00	0.05318	0.036398	0.047782
110.00	0.018823	0.018944	0.017815

3. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ของแครอทที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ ด้วยการนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้กับเวลาการอบแห้งมาวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดโดยใช้โปรแกรม statistica ด้วยวิธี least squares โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี จำนวน 20 เทอมตามสมการ

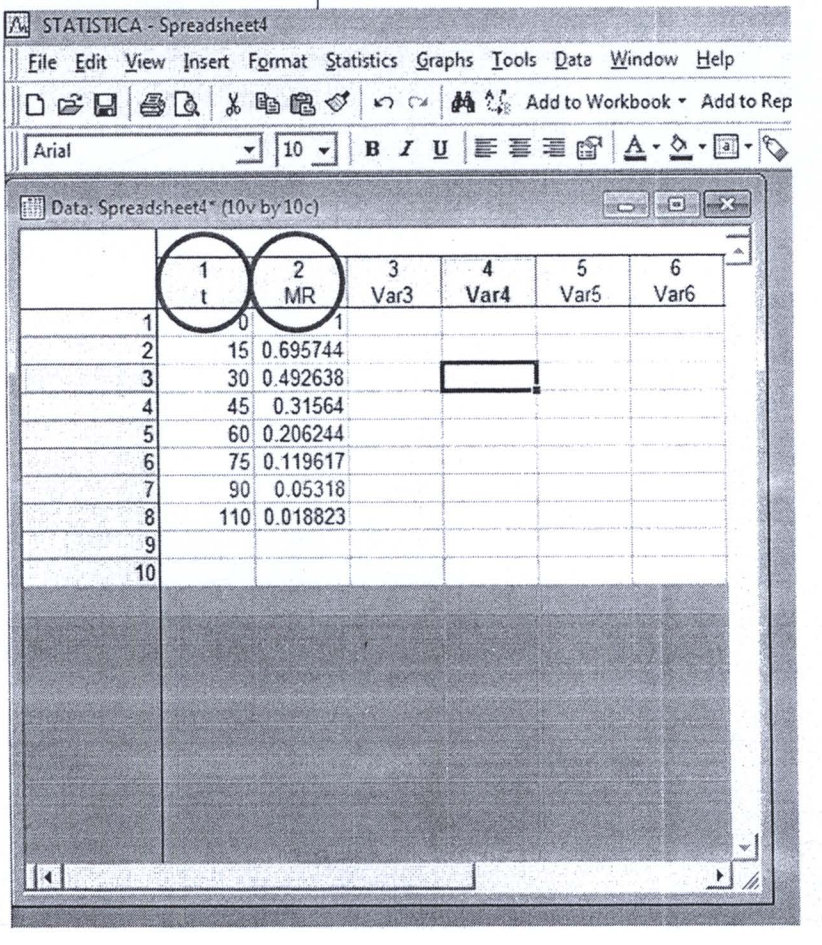
$$\overline{MR} = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff} t}{l^2}\right] \qquad (21)$$

ขั้นตอนการหา D_{eff} โดยใช้โปรแกรม Statistica

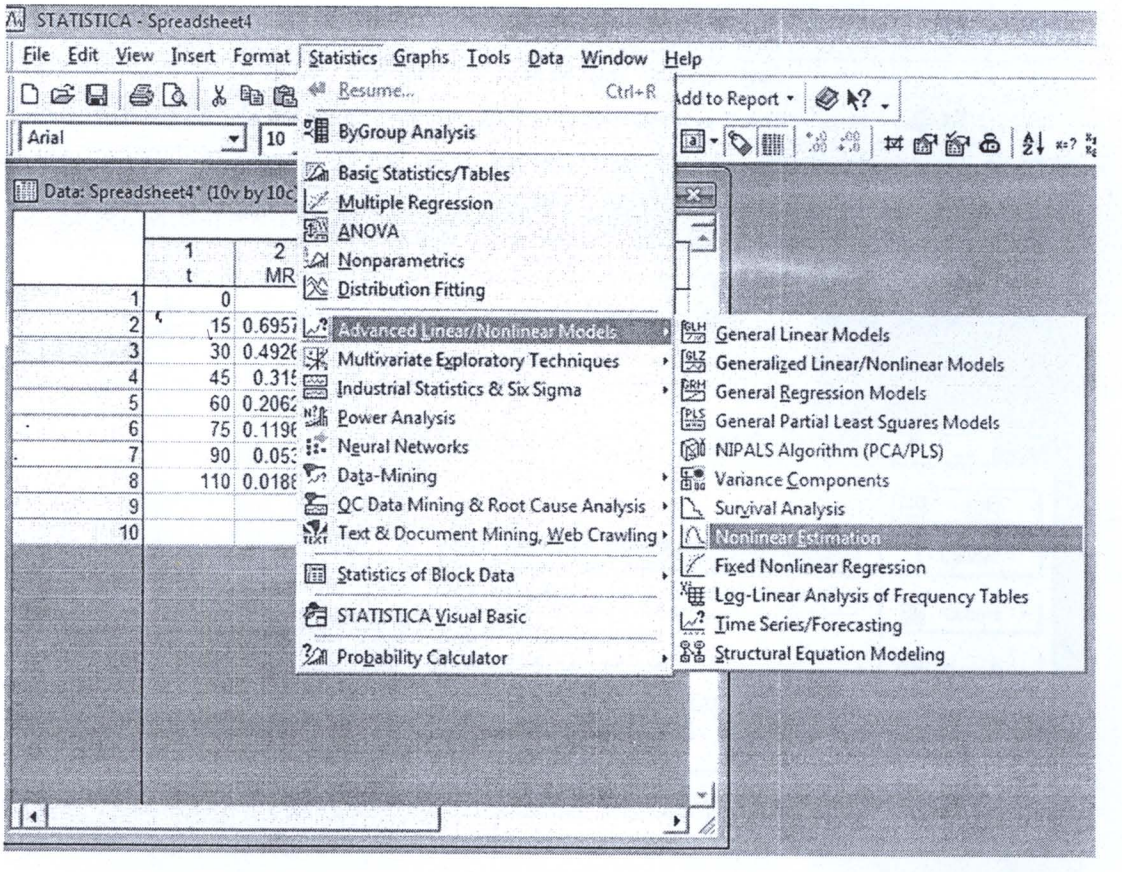
3.1 เปิด Statistica

3.2 ใส่ข้อมูลเวลา (t) กับ MR จำนวน 1 ชุดใน Spreadsheet แล้ว double click ที่คำว่า var 1 และ var 2 เพื่อตั้งชื่อให้ข้อมูล จากนั้นตั้งชื่อข้อมูล

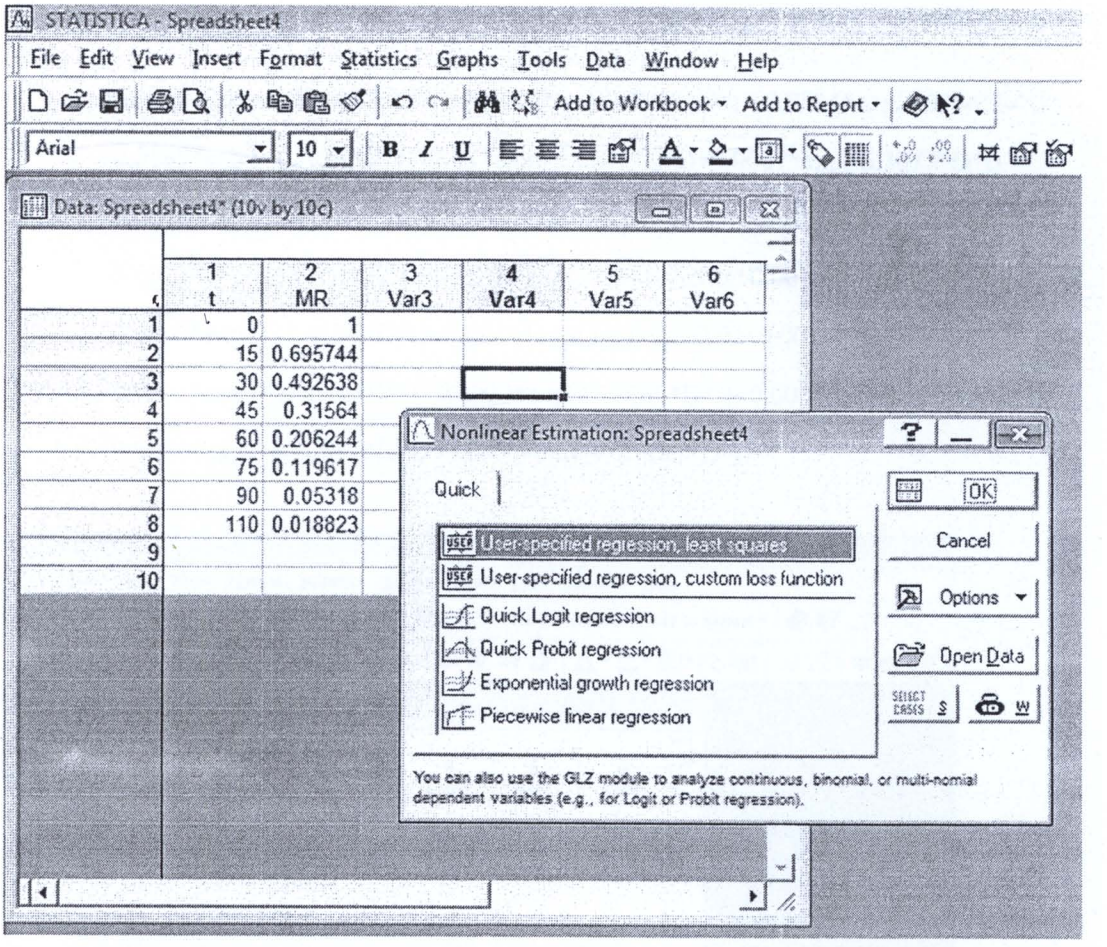
Time		MR	
0.00	1	1	1
15.00	0.695744	0.724524	0.739005
30.00	0.492638	0.471431	0.524024
45.00	0.31564	0.290518	0.344803
60.00	0.206244	0.152575	0.219831
75.00	0.119617	0.109811	0.135241
90.00	0.05318	0.036398	0.047782
110.00	0.018823	0.018944	0.017815



3.3 กด Statistic → Advanced Linear/Nonlinear Models → Nonlinear Estimation

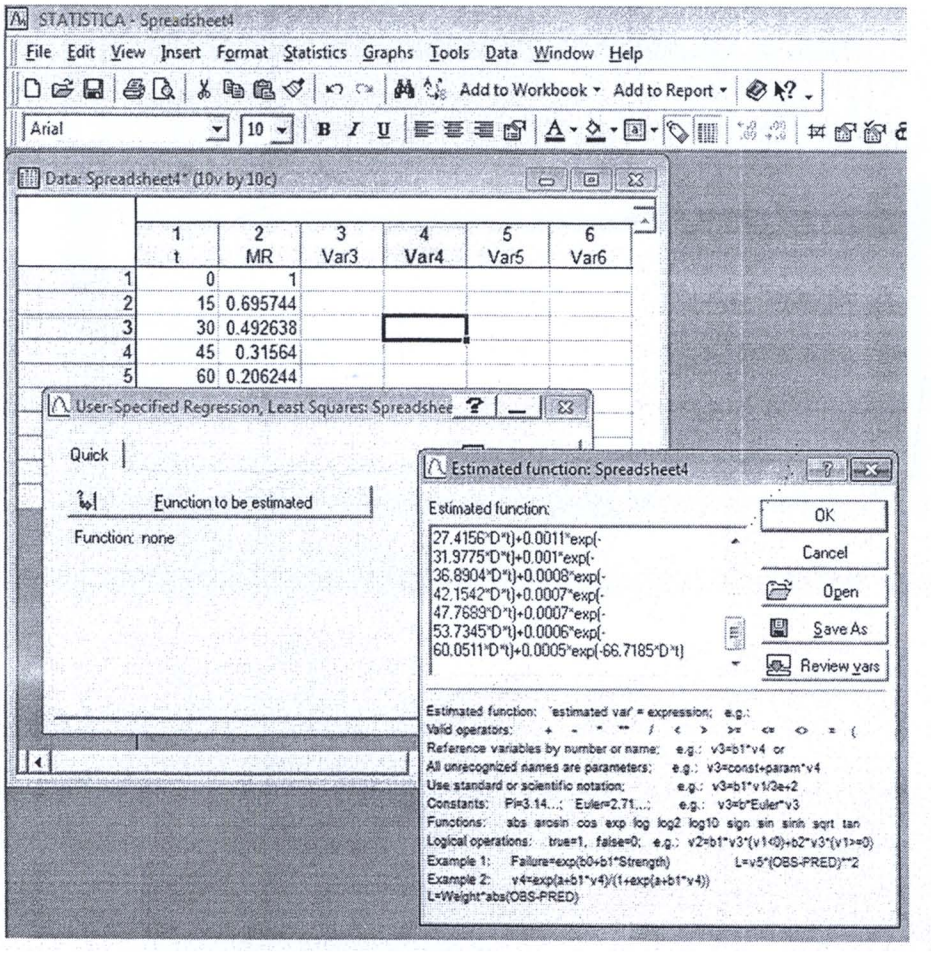


3.4 จะมีหน้าต่างขึ้นมา...เลือก User-specified regression, least squares → OK

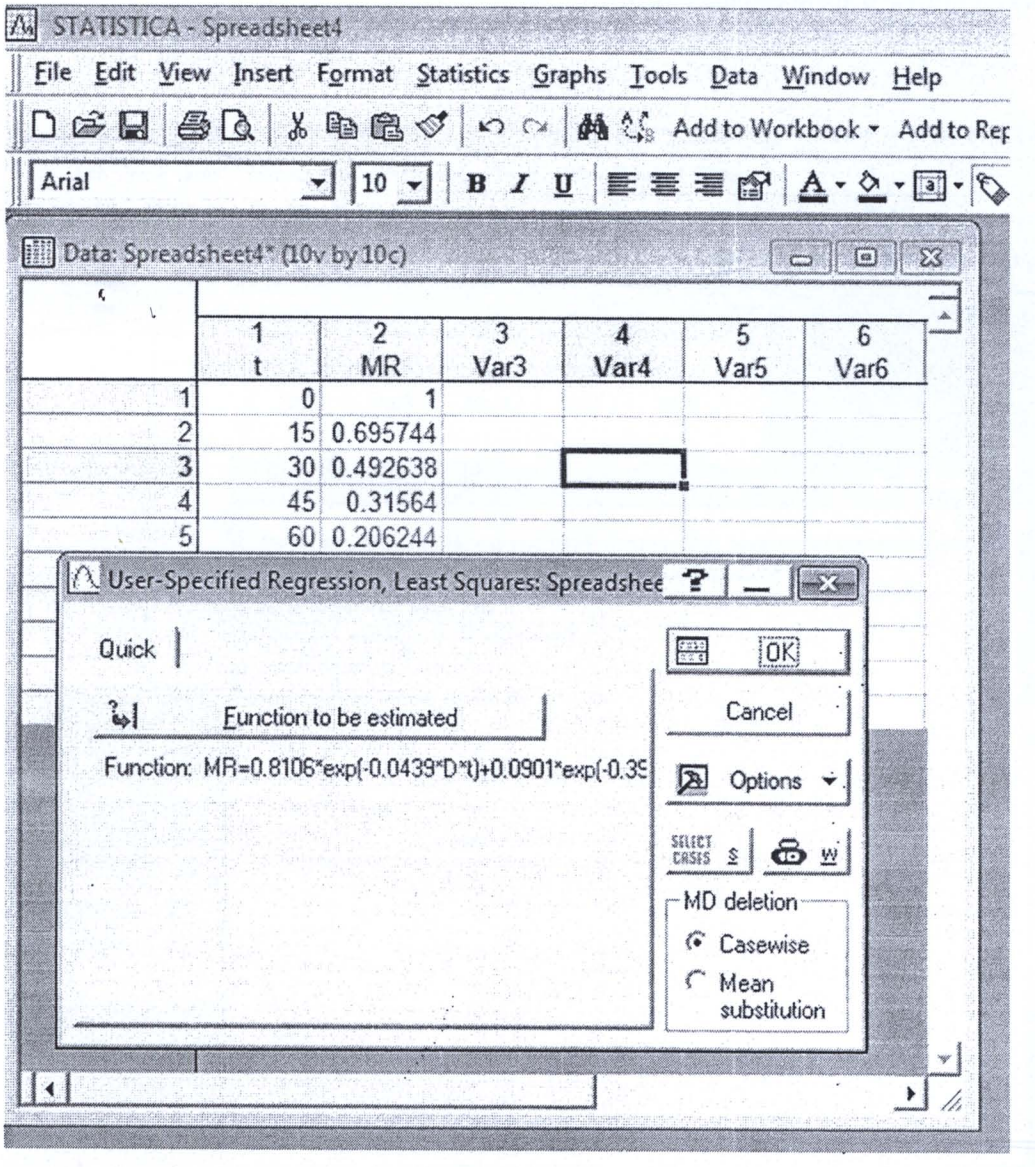


3.5 จะมีหน้าต่างขึ้นมา กดที่ Function to be estimated จะมีหน้าต่างขึ้นมาให้ใส่สมการ MR กรณีนี้ใช้ MR แบบ infinite-slab 20 เทอม ดังนี้

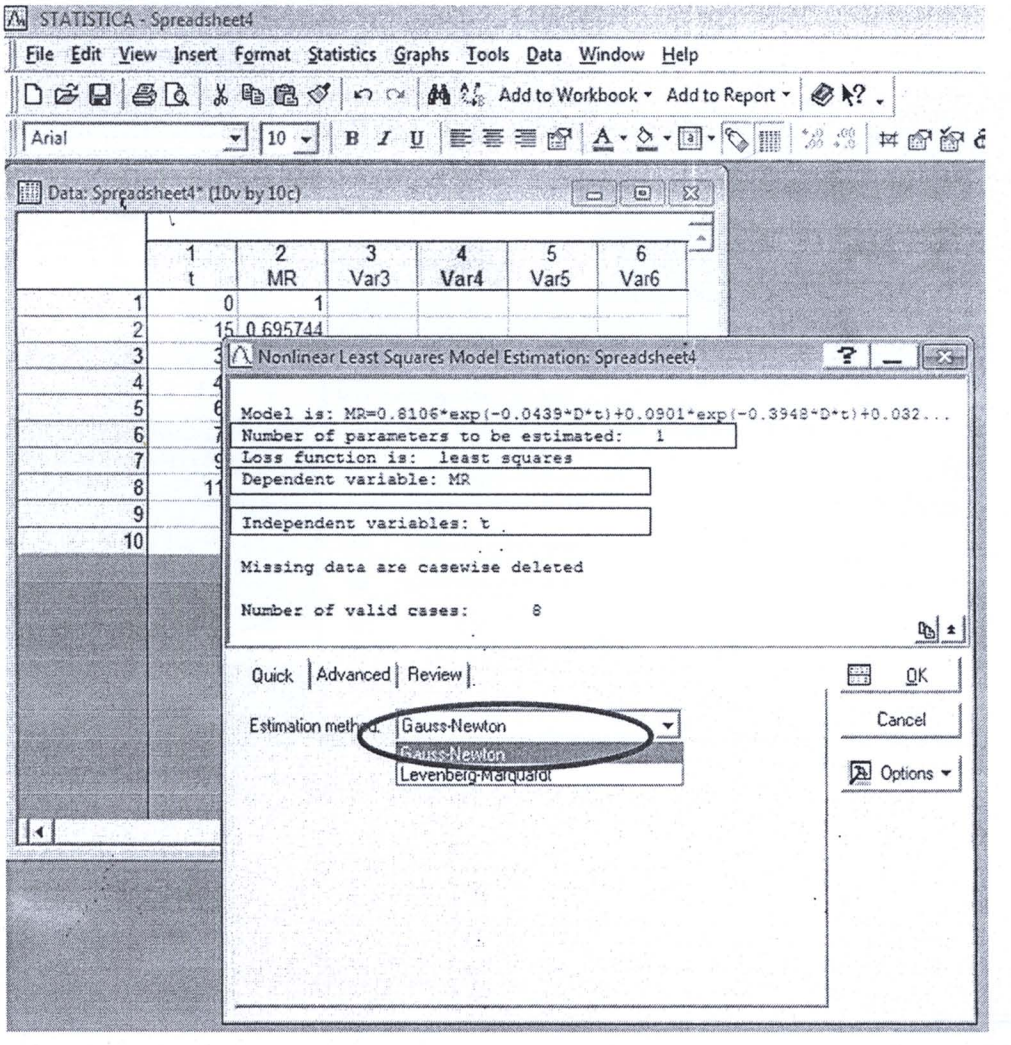
MR=0.8106*exp (0.0439*D*t)+0.0901*exp(0.3948*D*t)+0.0324*exp(1.0966*D*t)
+0.0165*exp (-2.1494*D*t)+0.01*exp(-3.5531*D*t)+0.0067*exp(-5.3077*D*t)
+0.0048*exp (-7.4132*D*t)+0.0036*exp(-9.8696*D*t)+0.0028*exp(-12.677*D*t)
+0.0022*exp (15.8352*D*t)+0.0018*exp(19.3444*D*t)+0.0015*exp(23.2045*D*t)
+0.0013*exp (-27.4156*D*t)+0.0011*exp(31.9775*D*t)+0.001*exp(36.8904*D*t)
+0.0008*exp (42.1542*D*t)+0.0007*exp(47.7689*D*t)+0.0007*exp(53.7345*D*t)
+0.0006*exp (-60.0511*D*t)+0.0005*exp(-66.7185*D*t)



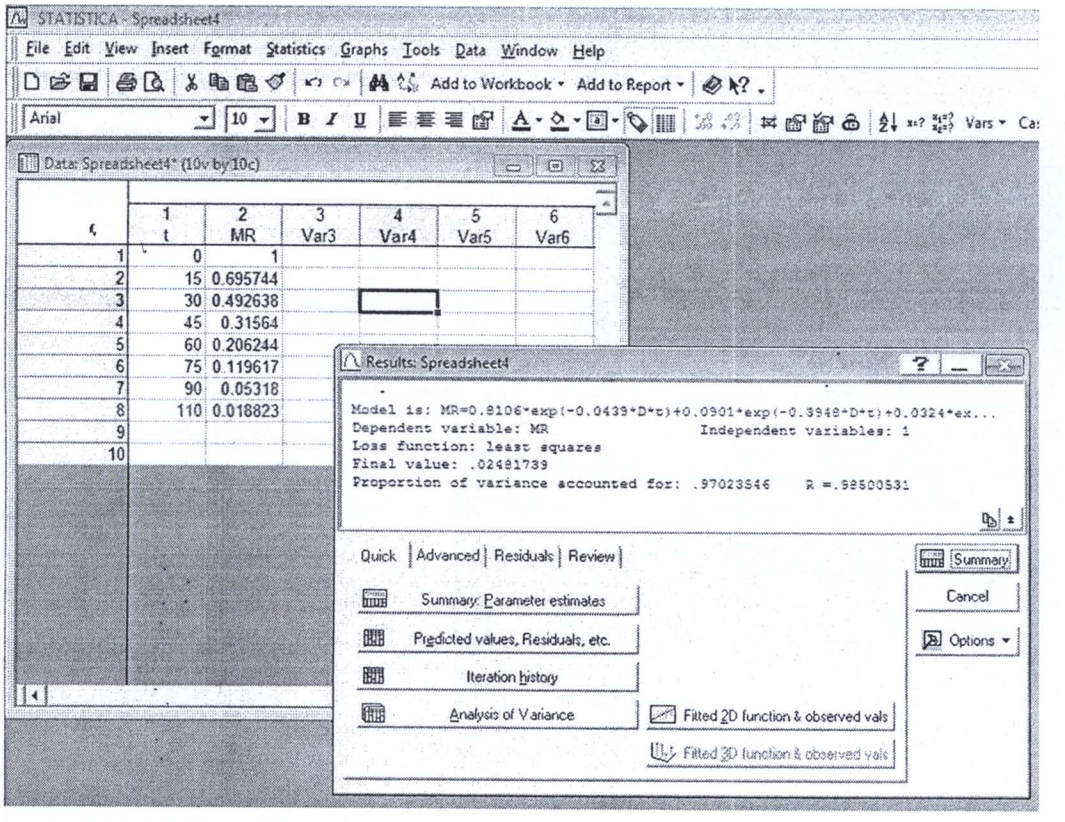
3.6 กลับมาหน้าต่างเดิม... กด OK



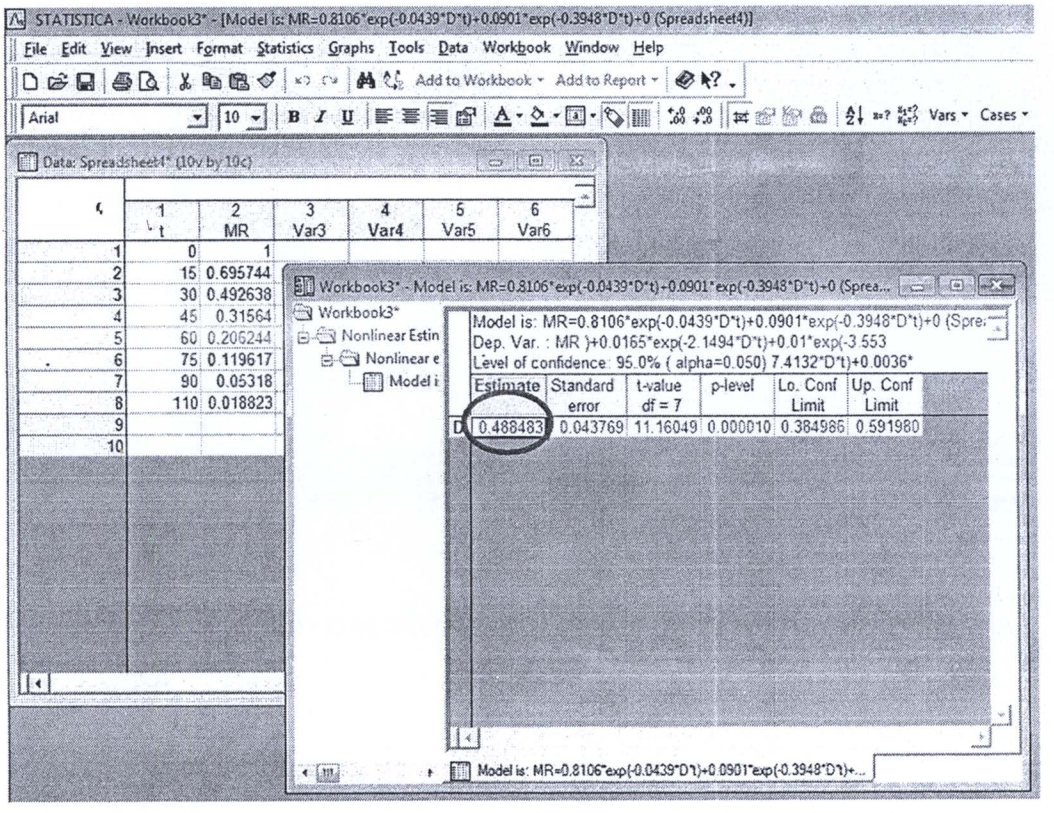
3.7 จะมีหน้าต่างใหม่ขึ้นมา...หน้าต่างนี้จะแสดงข้อมูลต่างๆ ก่อนที่จะเริ่มคำนวณ เช่น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม จำนวนตัวแปรที่ต้องการจากนั้นเซ็ต Estimate Method ซึ่งปกติจะเซ็ตไว้เป็น Gauss-Newton กด OK

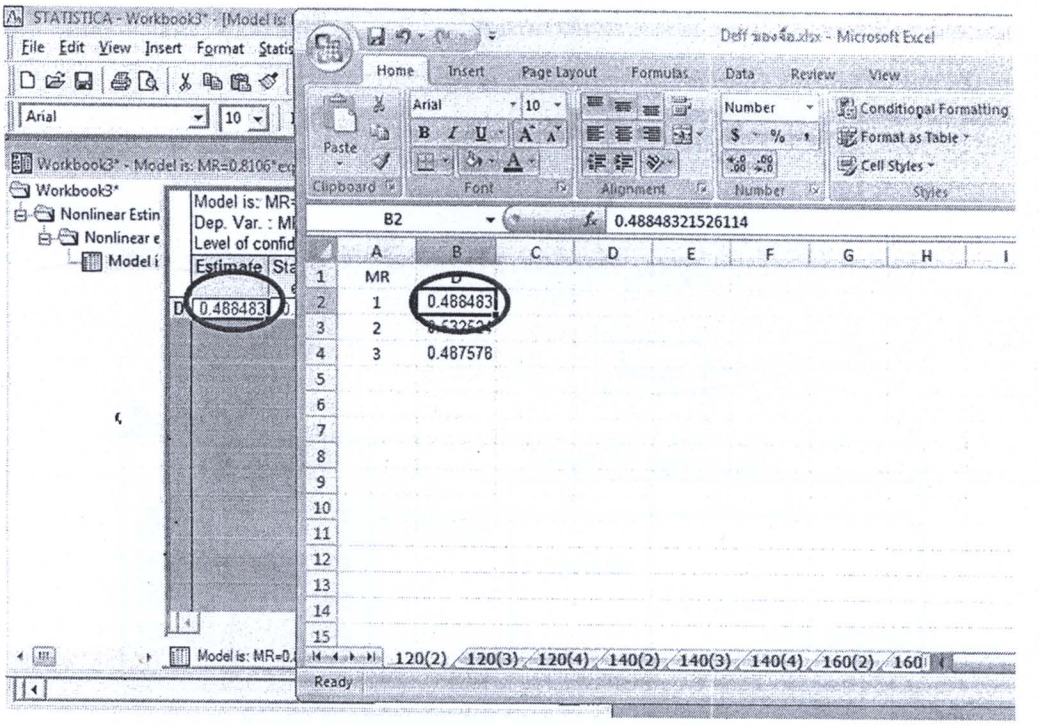


3.8 โปรแกรมจะคำนวณ (ขึ้นกับปริมาณข้อมูล) แล้วจะขึ้นหน้าต่างสรุป...กด Summary เพื่อดู



3.9 จะได้ค่า D ออกมา **แต่ต้องคูณค่าที่ได้ด้วย 10^{-8}** เพราะในสมการ MR (ในข้อ 5) ได้ทำการพัฒนาให้ค่า D ที่คำนวณได้ออกมาในรูปเลขหลักหน่วยหรือหลักสิบ





3.10 ถ้าต้องการคำนวณค่า D ของเงื่อนไขต่อไป ให้กลับไปที่ Spreadsheet แล้วใส่ข้อมูลใหม่

4. นำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่คำนวณได้จากข้อ 3 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย ANOVA Analysis เพื่อดูว่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายในห้องอบแห้งเป็นตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นปรากฏหรือไม่

4.1 กรณีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

D 2m/s

Duncan[a]

T	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
120.00	3	4.930E-09			
140.00	3		6.264E-09		
160.00	3			7.771E-09	
180.00	3				1.349E-08
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

D 3m/s

Duncan[a]

T	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
120.00	3	5.693E-09		
140.00	3	6.561E-09		
160.00	3		9.531E-09	
180.00	3			1.659E-08
Sig.		.156	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4m/s

D

Duncan[a]

T	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
120.00	3	5.413E-09			
140.00	3		8.438E-09		
160.00	3			1.454E-08	
180.00	3				2.652E-08
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.2 กรณีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

D

120 °C

Duncan[a]

V	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
2.00	3	4.930E-09	
4.00	3	5.413E-09	5.413E-09
3.00	3		5.693E-09
Sig.		.122	.337

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

140 °C

D

Duncan[a]

V	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
2.00	3	6.264E-09	
3.00	3	6.561E-09	
4.00	3		8.438E-09
Sig.		.483	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

D

160 °C

Duncan[a]

V	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
2.00	3	7.771E-09		
3.00	3		9.531E-09	
4.00	3			1.454E-08
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

180 °C

D

Duncan[a]

V	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
2.00	3	1.349E-08	
3.00	3	1.659E-08	
4.00	3		2.652E-08
Sig.		.065	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

5. นำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นปรากฏที่คำนวณได้จากข้อ 3 มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียวและอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งในรูปแบบสมการของ Arrhenius สมการ (22), (23) และ (24) โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด

กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว จะนำค่า D_{eff} ของแต่ละเงื่อนไข มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งในรูปแบบสมการของ Arrhenius ดังสมการ (22) ซึ่งจะสามารถหาค่า D_0 และ E_a ได้โดยการแทนค่า D_{eff} และค่า T_{abs} ในแต่ละเงื่อนไข

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right] \qquad (22)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ, m^2/h

D_o คือ อาร์ริเนียสเฟกเตอร์ (Arrhenius factor), m^2/h

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (Activation energy), kJ/kmol

R คือ ค่าคงที่ก๊าซสากล (Universal gas constant) มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/kmol·K

ค่า D_{eff} และ T_{abs} ในแต่ละเงื่อนไข Model 3

T_{abs} (K)	D_{eff} (m^2/h)
393.15	4.23E-09
413.15	7.23E-09
433.15	1.18E-08
453.15	1.83E-08

ใช้โปรแกรม Statistica คำนวณหาค่า D_0 และ E_a ตามสมการ (22) จะได้ค่าดังกล่าวตามนี้

D_0	E_a
0.000275	36.22427

6. เมื่อได้สมการค่า D_{eff} มาแล้วก็จะสามารถคำนวณหา MR (Model) ย้อนกลับได้จากสมการ (21) โดยใช้จำนวน 20 เทอม

$$\overline{MR} = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}t}{l^2}\right] \qquad (21)$$

ในกรณีที่กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะนำค่า D_{eff} ของแต่ละเงื่อนไข มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในรูปแบบสมการโพลิโนเมียลและเอกซ์โปรเนนเชียล ดังนี้

Model 1 $$D_{eff} = (a_1V^2 + a_2V + a_3)\exp\left[\frac{-a_4}{RT_{abs}}\right] \quad (23)$$

ในกรณีของ Model 1 ทำการแทนค่า D_{eff}, T และ V ในสมการ (23) เพื่อหาค่าตัวแปรแต่ละตัวโดยใช้โปรแกรม Statistica จะได้

a_1	a_2	a_3	a_4
0.00007	-0.00028	0.00061	37.96563

Model 2 $$D_{eff} = (a_1V^2T^2 + a_2V^2T + a_3VT^2 + a_4V^2 + a_5T^2 + a_6VT + a_7V + a_8T + a_9) \quad (24)$$

ในกรณีของ Model 2 ทำการแทนค่า D_{eff}, T และ V ในสมการ (24) เพื่อหาค่าตัวแปรแต่ละตัวโดยใช้โปรแกรม Statistica จะได้

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
6.35 E-13	-5.02 E-10	9.99 E-08	-2.55 E-12	2.01 E-09	-4.01 E-07	8.81 E-07	5.59 E-12	-4.42 E-09

ค่า D_{eff} และ T_{abs} ในแต่ละเงื่อนไขของ Model 1

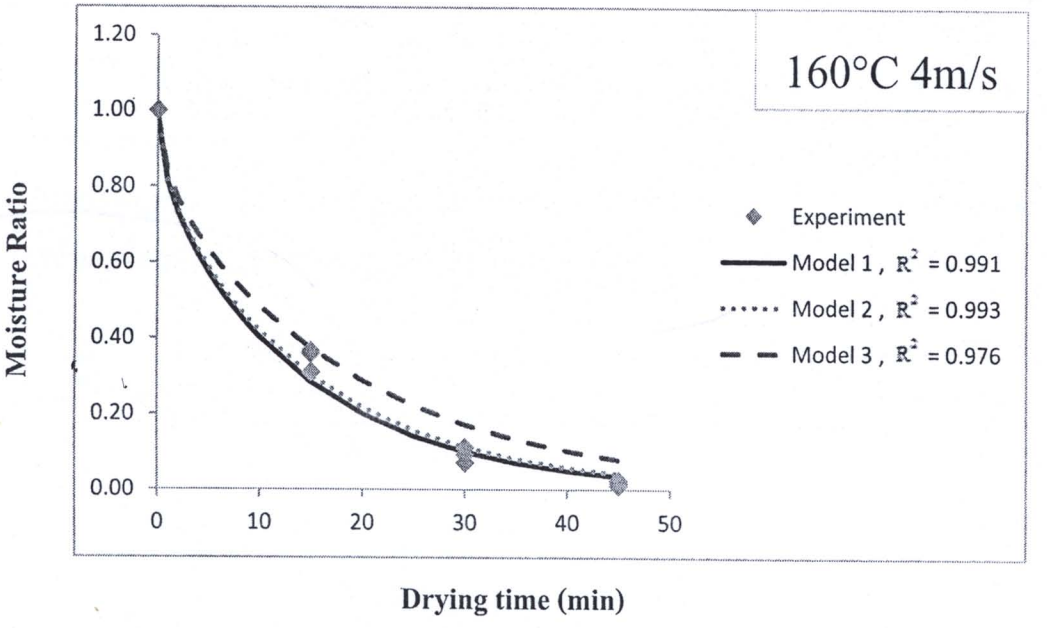
T (°C)	v (m/s)	T_{abs} (K)	D_{eff} (m^2/h)
120	2	393.15	2.958E-09
120	3	393.15	3.566E-09
120	4	393.15	5.429E-09
140	2	413.15	5.191E-09
140	3	413.15	6.258E-09
140	4	413.15	9.526E-09
160	2	433.15	8.648E-09
160	3	433.15	1.042E-08
160	4	433.15	1.587E-08
180	2	453.15	1.377E-08
180	3	453.15	1.660E-08
180	4	453.15	2.527E-08

ค่า D_{eff} และ T_{abs} ในแต่ละเงื่อนไขของ Model 2

T (°C)	v (m/s)	T_{abs} (K)	D_{eff} (m^2/h)
120	2	393.15	3.84E-09
120	3	393.15	4.63E-09
120	4	393.15	7.02E-09
140	2	413.15	4.81E-09
140	3	413.15	5.80E-09
140	4	413.15	8.79E-09
160	2	433.15	8.21E-09
160	3	433.15	9.90E-09
160	4	433.15	1.50E-08
180	2	453.15	1.40E-08
180	3	453.15	1.69E-08
180	4	453.15	2.57E-08

7. ค่า MR (model) จากการคำนวณย้อนกลับจากสมการที่ 21 เทียบกับ MR (exp)

t (min)	MR (Model 1)	MR (Model 2)	MR (Model 3)	MR (exp)
0.00	0.99	0.99	0.99	1.00
15.00	0.29	0.30	0.37	0.31
30.00	0.10	0.11	0.17	0.11
45.00	0.04	0.04	0.08	0.02



จากรูปแสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการ (21) โดยใช้ค่า D_{eff} จากสมการ Model 1, Model 2 และ Model 3 พบว่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง กับค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณจากทุกแบบจำลองที่อุณหภูมิ 160 °C ความเร็ว 4 m/s มีผลใกล้เคียงกัน

8. วิเคราะห์ความแม่นยำในการทำนายของสมการจลนพลศาสตร์ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการคำนวณโดยใช้ ค่า R^2 และ Mean Residual Square: MRS ตามสมการ (26) และ (27) เป็นเกณฑ์เลือกใช้สมการที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองดังสมการ

$$*R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n}(X_{\exp} - X_{pr})^2}{\sum_{j=1}^{n}(\overline{X} - X_{pr})^2}, \qquad (26)$$

$$**MRS = \frac{\sum_{j=1}^{n}(X_{pr} - X_{\exp})^2}{N} \qquad (27)$$

เมื่อ X_{pr} = ค่าตัวแปรตามที่คำนวณได้จากสมการการวิเคราะห์แบบกำลังสองน้อยที่สุด

$\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง

X_{exp} = ค่าของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ตัวอย่างการหาค่า R^2, และ Mean Residual Square: MRS

Model	Equation	R^2	MRS
Model 1	$D = (7x10^{-5}V^2 - 2.8x10^{-4}V + 6.1x10^{-4})exp(-37.97/RT)$	0.950	$1.90x10^{-18}$

			T = 120 °C			
	(m^2/h)		= 393.15 K		(m^2/h)		
	D_{eff}(exp)	T (°C)	v (m/s)	T (K)	D_{eff}(pre)	D_{eff}(pre-$\overline{D}$)^2	D_{eff}(exp-pre)^2
	4.58E-09	120	2	393.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	5.33E-09	120	2	393.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	4.88E-09	120	2	393.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	5.79E-09	120	3	393.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	5.86E-09	120	3	393.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	5.43E-09	120	3	393.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	5.28E-09	120	4	393.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	5.82E-09	120	4	393.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	5.14E-09	120	4	393.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	6.84E-09	140	2	413.15	5.19E-09	2.80E-17	2.71E-18
	6.33E-09	140	2	413.15	5.19E-09	2.80E-17	1.31E-18
	5.62E-09	140	2	413.15	5.19E-09	2.80E-17	1.86E-19
	6.40E-09	140	3	413.15	6.26E-09	1.78E-17	2.12E-20
	6.74E-09	140	3	413.15	6.26E-09	1.78E-17	2.29E-19
	6.54E-09	140	3	413.15	6.26E-09	1.78E-17	8.05E-20
	8.17E-09	140	4	413.15	9.53E-09	9.08E-19	1.83E-18
	8.07E-09	140	4	413.15	9.53E-09	9.08E-19	2.13E-18
	9.08E-09	140	4	413.15	9.53E-09	9.08E-19	2.02E-19
	8.34E-09	160	2	433.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	8.03E-09	160	2	433.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	6.94E-09	160	2	433.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	1.00E-08	160	3	433.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	9.31E-09	160	3	433.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	9.24E-09	160	3	433.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	1.50E-08	160	4	433.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	1.46E-08	160	4	433.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	1.40E-08	160	4	433.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	1.42E-08	180	2	453.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	1.29E-08	180	2	453.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	1.34E-08	180	2	453.15	3.28E-04	1.07E-07	1.07E-07
	1.80E-08	180	3	453.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	1.61E-08	180	3	453.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	1.56E-08	180	3	453.15	3.95E-04	1.56E-07	1.56E-07
	2.93E-08	180	4	453.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	2.42E-08	180	4	453.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
	2.61E-08	180	4	453.15	6.01E-04	3.62E-07	3.62E-07
$\overline{D}$ =	1.05E-08				sum	5.62E-06	5.62E-06
	$*R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(D_{exp} - D_{pre})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\overline{D} - D_{pre})^2}$,				R^2	0.00	
	$**MRS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(D_{pre} - D_{exp})^2}{N}$				MRS	1.56E-07	

ภาคผนวก ฉ

บทความตีพิมพ์

การประชุม "การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 10" วันที่ 10 – 11 มีนาคม 2554 ณ โรงแรม เชียงใหม่แกรด์วิว จังหวัดเชียงใหม่

ผลของสภาวะไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อจลนพลศาสตร์และผลิตภัณฑ์ของการอบแห้งแครอทแผ่น

Effect of Superheated Steam Conditions on Kinetics and Product of Sliced Carrot Drying

ชีรัสมักรัญ ศัพปรียะธฎา
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
(สาขาวิศวกรรมพลังงาน)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
โทร 08-3570-9990
E-mail: Jupiter_st@hotmail.com

กอคขวัญ นามสวน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
โทร 053-944148
E-mail: Kodkwan_n@yahoo.com

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของแครอทแผ่น โดยได้ทำการทดลองอบแห้งแครอทแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งด้วยเครื่องทดสอบอัตราการอบแห้งในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140, 160 และ 180°C ± 2°C และความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วง 2 m/s ถึง 4 m/s ภายใต้ความดันบรรยากาศ แครอทแผ่นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1000% มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนเหลือความชื้นประมาณ 18% มาตรฐานแห้ง พบว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น ทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง สำหรับคุณภาพของแครอทแผ่นหลังการอบแห้งที่ศึกษาได้แก่ สี เนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง และค่าความเหนียว) และการหดตัว จากการพิจารณาค่าสี เนื้อสัมผัสและการหดตัว พบว่าเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและลดลงที่อุณหภูมิสูง ค่าความเป็นสีเหลืองมากขึ้นและค่าความสว่างเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นพบว่าค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและลดลงที่อุณหภูมิสูงและค่าความสว่างเพิ่มขึ้น ส่วนการหดตัวน้อยลง ความแข็งและความเหนียวลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น

คำหลัก : แครอทแผ่น, ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, การหดตัว, สี, เนื้อสัมผัส

ABSTRACT The purpose of this research is to study the effects of superheated steam temperature and steam velocity on drying kinetics and quality of sliced carrot. In the experiment, sliced carrot was dried by using laboratory superheated steam dryer at temperatures of 120, 140, 160 and 180°C ± 2°C and velocities of 2 - 4 m/s under atmospheric pressure. The moisture content of sliced carrot was reduced from 1000% to 18% dry basis. The results showed that the drying time decreased with increasing steam temperature and increasing steam velocity. For the quality of dried product, the criteria for evaluation of quality were color, texture (hardness and toughness) and shrinkage behavior. The results showed that yellowness and lightness values increased with increasing steam temperature. Otherwise, the redness value increased at low temperatures and decreased at high temperatures. Redness and yellowness values increased at low temperatures and decreased at high temperatures while lightness value increased when steam velocity increased. Hardness and toughness decreased, and shrinkage decreased with increasing steam temperature and increasing steam velocity.

Key words: Sliced carrot, Superheated steam, Shrinkage, Color, Texture

1.บทนำ

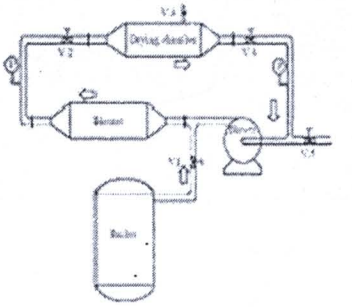
แครอทเป็นพืชกินหัวที่มีปลูกมากในประเทศไทยและเป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว แครอทมีชื่อสำนักในแถบเอเชียตะวันออกและเอเชียกลาง ออกดอกราวเดือนพฤษภาคมถึงกุมภาพันธ์ ดอกแตกเป็นชั้นคล้ายร่ม ชั้นแรกสีขาวนวล ตรงกลางสีม่วงเข้ม และตรงปลายโบราณมีเนื้อแข็ง เส้นใยและเหมือนไม้ สีของตัวแครอทมีตั้งแต่สีเหลืองไปจนถึงสีม่วง แต่แครอทสีส้มที่รับประทานกันอยู่ทุกวันนี้เป็นแครอทที่ได้รับการพัฒนาสายพันธุ์เมื่อคศวรรษที่ 18 นี้เอง อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวคุณภาพของแครอทจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากแครอทจะมีการคายน้ำสูง เพื่อเร่งรีบได้มีการนำการอบแห้งมาใช้เพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้โดยการลดความชื้น ซึ่งนอกจากจะเพิ่มอายุเวลาการเก็บรักษาแล้ว การอบแห้งยังสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ขึ้นมาได้ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับแครอทได้ด้วย แครอทอบแห้งและแครอทกดกรอบสามารถบริโภคเป็นอาหารว่างหรือใช้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเช้าได้ (ซีเรียล) การอบแห้งอาหารมักจะอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งจะใช้เวลาในการอบนาน ส่วนการทอดกรอบผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะมีปริมาณน้ำมันสูงและไม่สามารถเก็บไว้ได้นานเพราะมีกลิ่นหืนและไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจึงได้ถูกนำมาใช้เนื่องมาจากการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นวิธีการอบแห้งอีกวิธีหนึ่งที่มีศักยภาพสูงโดยให้อัตราการอบแห้งสูง ผลิตภัณฑ์มีการหดตัวมาก มีการหดตัวน้อย คุณภาพดี ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาในการอบแห้งแครอทโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้งที่มีคุณภาพดี และลดการสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะวิเคราะห์สภาวะการอบแห้ง คือ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีผลต่อการอบแห้งแครอทต่อเวลาอบแห้งและคุณภาพ และพิจารณาหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของแครอทแผ่น

2.วิธีการทดลอง

2.1 การอบแห้งแครอทแผ่น

นำแครอทสดความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1000% มาตรฐานแห้ง มาวางแล้วนำมาตัดกรีดตามขวางออกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 ± 1 มิลลิเมตร มาตัดทางด้านบนของแครอทแล้วนำมาตั้งตามขวางหนา 3 ± 0.1 มิลลิเมตร นำวางลงในถาดทั้งหมด 8 ชิ้น น้ำหนักประมาณ 25 กรัม แล้วนำเข้าเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งสำหรับทดลองอัตราการอบแห้งในห้องปฏิบัติการโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140, 160 และ 180 °C และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2, 3 และ 4 m/s

ในการหาการลดลงของความชื้นระหว่างการอบแห้งในแต่ละสภาวะการอบแห้งจะทำการอบแห้งแบบทำลายคือทำการอบแห้งตัวอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่กำหนด แล้วจึงนำตัวอย่างนั้นไปชั่งน้ำหนักและหาความชื้น หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนตัวอย่างใหม่เข้าไปอบโดยเพิ่มเวลาให้มากขึ้น กล่าวคือตัวอย่างแรกทำการอบ 15 นาทีแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก ต่อไปเปลี่ยนตัวอย่างใหม่ทำการอบ 30 นาทีแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะถูกเพิ่มครั้งละ 5 – 15 นาที ทำการอบแห้งตัวอย่างจนกระทั่งเหลือความชื้นประมาณ 18% มาตรฐานแห้ง ในการทดลองแต่ละเงื่อนไขจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ



รูป 1 ระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

2.2 การวัดสี

ทำการวัดสีของแครอทแผ่นหลังการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Minolta XE Plus ทำการวัดสีโดยระบบที่ค่า L, a และ b (L คือ ค่าความสว่าง, a คือ ค่าความเป็นสีแดง และ b คือ ค่าความเป็นสีเหลือง) โดยจะทำการวัดสีชิ้นละ 6 จุด (หน้า 3 จุด หลัง 3 จุด) จุดละ 3 ครั้ง แต่ละเงื่อนไขการอบแห้งอย่างน้อย 8 ตัวอย่าง

2.3 การวัดเนื้อสัมผัส

นำแครอทแผ่นหลังการอบแห้งมาทำการวัดโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer โดยใช้หัวกดแบบใบมีด (Blade set with knife) ทำการกดด้วยความเร็วคงที่ 2 mm/s และนำข้อมูลมาหาค่าหาความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Toughness) ซึ่งในแต่ละการทดลองจะนำแครอทหลังการอบแห้งจำนวน 8 ชิ้น มาทำการทดลองวัดเนื้อสัมผัสโดยแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ

2.4 การหดตัว

นำแครอทแผ่นหลังการอบแห้งมาทำการวัดการหดตัวโดยจะทำการวัดปริมาตรของตัวอย่างด้วยวิธีการแทนที่ของเหลว (น้ำมันพืช) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

$$\% \, shrinkage = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100$$

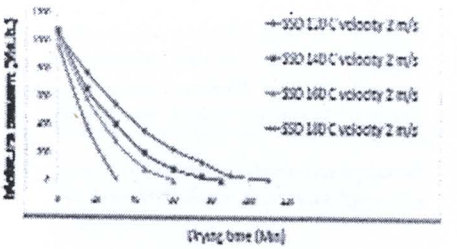
เมื่อ V_i คือ ปริมาตรของแครอทเริ่มต้นแผ่น, cm^3

V_f คือ ปริมาตรของแครอทหลังอบ, cm^3

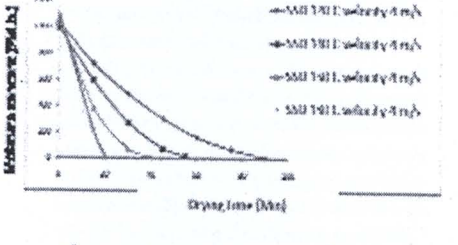
3.ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองหาการลดลงของความชื้นของการอบแห้ง แครอทแผ่นโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากผลการทดลองอบแห้งแครอทแผ่นที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C และความเร็วลมไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 และ 4 m/s แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่าการลดลงของความชื้นมีลักษณะลดลงเป็นเส้นตรงในช่วงแรกและค่อยๆลดลงตัวช้าลงที่หลัง ซึ่งหมายความว่าอัตราการลำเลียงมวลของน้ำในแครอทที่ผิวแครอทมีค่ามากในช่วงแรกและลดลงจนกระทั่งวัสดุมีความชื้น 16% มาตรฐานแห้ง จากการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่า เวลาที่ใช้อบแห้งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และการทดลองให้ผลเช่นเดียวกันที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3 และ 4 m/s และจากการวิเคราะห์ผลของความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าเวลาที่ใช้อบแห้งจะลดลงเมื่อความเร็วสูงขึ้น



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นของแครอทกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นของแครอทกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140, 160 และ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s

3.2 ค่าสีของผลิตภัณฑ์

จากผลการวัดค่าสีของแครอทและนำผลมาวิเคราะห์ทางสถิติได้ผลแสดงดังตาราง 1 โดยค่าสีเริ่มต้นของแครอทมีค่า L* ประมาณ 48.87 ± 0.79 ค่า a* ประมาณ 25.15 ± 0.88 และค่า b* ประมาณ 21.99 ± 0.78 จากการวิเคราะห์ค่าสีของแครอทคือค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลือง พบว่ากรณีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น จะทำให้ค่าความสว่างมีแนวโน้มมากขึ้น ส่วนค่าความเป็นสีแดงมีค่าน้อยลงจากแครอทสดโดยแนวโน้มของสีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 120 เป็น 140°C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 140°C ใช้เวลาการอบแห้งสั้นกว่า 120°C ทำให้สีแดงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีอุณหภูมิ 160 และ 180°C ค่าความเป็นสีแดงกลับลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากทำให้โครงสร้างของแครอทที่เป็นเบ้าโดนทำลาย สีแดงจึงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 160°C เป็น 180°C ทั้งนี้เนื่องจากเวลาการอบแห้งที่ 180°C สั้นกว่าช่วง 160°C มาก โครงสร้างจึงโดนทำลายน้อยกว่า และในส่วนค่าความเป็นสีเหลืองพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ส่วนกรณีของความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าถ้าความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความสว่างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าของสีแดงพบว่ามีแนวโน้มเดียวกับค่าของสีเหลือง กล่าวคือความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มสูงขึ้นค่าสีเหลืองของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีที่ใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำ (ช่วงอุณหภูมิ 120 - 140°C) และมีค่าลดลงในกรณีที่ใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูง (ช่วงอุณหภูมิ 160 - 180°C) โดยพบว่าค่าสีอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือจะอยู่ในโทนสีน้ำตาลเข้มถึงส้มแดง เนื่องจากการอบแห้งอยู่ในอุณหภูมิสูงตลอดกระบวนการซึ่งเกิดลักษณะเหมือนการไหม้ขึ้นบนผลิตภัณฑ์ กระบวนการอบแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้อุณหภูมิ 140°C ความเร็ว 3 m/s ให้ช่วงของสีที่มีค่าใกล้เคียงแครอทสดมากที่สุด

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการหดตัวรวมถึงเวลาการอบแห้ง การอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 160°C ความเร็ว 4 m/s น่าจะเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งแครอทโดยรวมเนื่องจากให้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด การหดตัว, ความแข็ง และความเหนียวน้อยที่สุดและค่าสียังเป็นสีส้มอ่อนซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์ค่าสีแครอทอบแห้งหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Condition	Color parameter		
	L*	a*	b*
Fresh carrot	46.71±0.79^{bcd}	25.15±0.86^{g}	21.99±0.78^{h}
SSD120°C 2m/s	45.09±2.78^{d}	17.94±1.42^{fgh}	20.16±2.41^{a}
SSD140°C 2m/s	45.81±0.80^{cd}	22.42±1.25^{e}	23.07±3.13^{b}
SSD160°C 2m/s	48.27±1.56^{ef}	17.23±0.34^{b}	33.79±1.76^{d}
SSD180°C 2m/s	52.96±1.30^{i}	18.66±1.24^{c}	35.63±2.80^{h}
SSD120°C 3m/s	49.94±1.71^{g}	20.81±2.25^{d}	25.35±2.13^{cd}
SSD140°C 3m/s	48.97±1.45^{fg}	24.09±1.34^{f}	26.38±1.65^{e}
SSD160°C 3m/s	49.79±1.30^{g}	18.28±0.34^{a}	32.33±1.56^{f}
SSD180°C 3m/s	51.90±1.25^{h}	17.92±1.19^{fgh}	33.38±1.70^{g}
SSD120°C 4m/s	48.35±3.17^{ef}	20.72±1.65^{d}	24.54±4.54^{c}
SSD140°C 4m/s	47.85±1.07^{de}	25.71±0.81^{g}	28.09±1.17^{e}
SSD160°C 4m/s	49.13±2.59^{fg}	18.36±1.27^{a}	28.92±1.52^{e}
SSD180°C 4m/s	52.09±1.51^{h}	17.41±1.45^{b}	31.55±1.94^{f}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับค่าของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่าให้ค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.3 เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองวัดค่าเนื้อสัมผัสของแครอทอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แสดงดังตาราง 2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น มีผลทำให้ความแข็งและความเหนียวของแครอทอบแห้งมีค่าความแข็งและความเหนียวลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นจะทำให้วัสดุมีการพองตัวมากกว่าและมีความพรุนมากกว่า จึงทำให้วัสดุเมื่อถอบแห้งแล้วมีความแข็งและเหนียวน้อยกว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งและความเหนียวของแครอทอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความเร็วต่างๆพบว่าความแข็งและความเหนียวมีค่าลดลงเมื่อความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงจึงช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ความแข็งและความเหนียวมีค่าลดลงโดยที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120 และ 140°C มีค่าความแข็งและความเหนียวมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งและสองตามลำดับ

ตาราง 2 ผลการวัดค่าเนื้อสัมผัสของแครอทอบแห้งหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Condition	Hardness (N)	Toughness (N)
SSD120°C 2m/s	54.93 ± 2.74^{h}	15.17 ± 1.29^{j}
SSD140°C 2m/s	47.35 ± 1.19^{f}	10.76 ± 1.70^{d}
SSD160°C 2m/s	25.93 ± 2.92^{c}	7.04± 1.71^{c}
SSD180°C 2m/s	23.78 ± 3.01^{bcd}	2.57±1.57^{a}
SSD120°C 3m/s	51.08 ± 1.91^{g}	13.87 ± 1.92^{ef}
SSD140°C 3m/s	42.86 ± 1.43^{e}	10.18 ± 1.11^{d}
SSD160°C 3m/s	23.98 ± 2.31^{bcd}	6.67 ± 1.16^{c}
SSD180°C 3m/s	22.30 ± 1.81^{b}	1.98 ± 0.57^{a}
SSD120°C 4m/s	47.22 ± 1.25^{f}	13.41 ± 1.63^{e}
SSD140°C 4m/s	39.40± 1.05^{d}	9.25 ± 1.75^{d}
SSD160°C 4m/s	21.65 ± 2.32^{b}	4.59 ± 0.95^{b}
SSD180°C 4m/s	18.82 ± 1.47^{a}	1.07 ± 0.72^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับค่าของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่าให้ค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.4 การหดตัวของผลิตภัณฑ์

ผลการทดลองการวัดค่าการหดตัวของแครอทอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แสดงดังตาราง 3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น จะทำให้การหดตัวแครอทมีค่าน้อยลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นจะทำให้วัสดุมีการพองตัวมากขึ้นในระหว่างการอบแห้ง โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จึงยุบตัวน้อยกว่า ทำให้การหดตัวลดลง ซึ่งผลสอดคล้องกับค่าเนื้อสัมผัสในตาราง 2 คือถ้าผลิตภัณฑ์มีการพองตัวมาก ก็จะมีรูพรุนมาก ผลิตภัณฑ์จึงหดตัวลดลง ทำให้มีความแข็งและความเหนียวน้อยลง ส่วนความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การหดตัวลดลง เนื่องมาจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง การหดตัวจึงน้อยลงโดยผลของความเร็วมีผลต่อการหดตัวน้อยกว่าผลของอุณหภูมิ

ตาราง 3 ผลการวัดการหดตัวของแครอทแผ่นหลังการอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ด้วยวิธีการแทนที่ของเหลว

Drying process	Shrinkage (%)
SSD120°C Velocity 2m/s	91.60 ± 0.54[a]
SSD140°C Velocity 2m/s	89.79 ± 0.84[a]
SSD160°C Velocity 2m/s	83.79 ± 2.57[b]
SSD180°C Velocity 2m/s	56.63 ± 3.93[c]
SSD120°C Velocity 3m/s	91.31 ± 1.71[a]
SSD140°C Velocity 3m/s	86.75 ± 3.19[b]
SSD160°C Velocity 3m/s	79.75 ± 3.15[c]
SSD180°C Velocity 3m/s	51.05 ± 4.14[d]
SSD120°C Velocity 4m/s	90.90 ± 1.05[a]
SSD140°C Velocity 4m/s	85.84 ± 4.28[b,c]
SSD160°C Velocity 4m/s	78.43 ± 2.80[c]
SSD180°C Velocity 4m/s	49.85 ± 5.21[d]

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับค่าของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่าให้ค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4. สรุป

จากการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพของแครอทแผ่นหลังการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นมีผลให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง

ส่วนด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์พบว่า การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C ความเร็วลม 3 m/s ให้สีของแครอทที่ผ่านการอบแห้งใกล้เคียงแครอทสดที่สุด โดยอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลให้ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และลดลงที่อุณหภูมิสูง ค่าความเป็นสีเหลืองมากขึ้น และค่าความสว่างเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิสูง ส่วนค่าความสว่างจะเพิ่มขึ้น และจากการพิจารณาด้านเนื้อสัมผัส และการหดตัว พบว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งและความเหนียวลดลงและการหดตัวน้อยลง

จากการพิจารณาทั้งคุณภาพ และระยะเวลาในการอบแห้งพบว่าการอบแห้งแครอทแผ่นโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 m/s เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถลดเวลาอบแห้งให้สั้นลง และแครอทแผ่นหลังการอบแห้งยังมีคุณภาพดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ทุนวิจัยและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ทรัพย์ วงศ์ศักดิ์ไพโรจน์. การอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.2543

[2] พลสันต์ วงษ์ศรี. การอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.2548

[3] Li, Y.B., Seyed-Yagoobi, Y.B., Moreira, O.R., and Yamsaengsung, R.1999. Superheated steam impingement drying of tortilla chips. Drying Technology. Vol 17. pp. 191 - 213.

[4] Meyer-Miebach, E., Beherendt, D., Regler, M. and Schuchmann, H.P. 2005. Thermal processing of carrots: Lycopene stability and isomerisation with regard to antioxidant potential. Food Research International. Vol 38. pp. 1103 – 1108.

[5] Kocabiyik, H. and Tezer, D. 2008. Drying of carrot slices using infrared radiation. International Journal of Food Science and Technology. Vol 43. pp. 953 – 959.

[6] Sribalden, J. and Roberts. J.S. 2005. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. Journal of Food Engineering. Vol 74. pp. 143 – 152.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ- สกุล	นายจิรัสย์กริณ ตันปรียะชญา
วัน เดือน ปี เกิด	25 สิงหาคม 2526
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษามัธยมตอนต้นและตอนปลาย จากโรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัยแผนกมัธยม จังหวัด เชียงใหม่
	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่