

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจีกับความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีและไอน้ำ

กำหนดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจีมีความสัมพันธ์กับอันดับของความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีและไอน้ำ เขียนสมการอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจีได้เป็น

$$-r_{LPG} = k [LPG]^a [H_2O]^b$$

โดยที่

$-r_{LPG}$ = อัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ซึ่งนิยามโดยจำนวนโมลของแก๊สแอลพีจีที่เข้าทำปฏิกิริยาต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยเวลา

[LPG] = ความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจี ซึ่งนิยามโดยจำนวนโมลของแก๊สแอลพีจี

[H₂O] = ความเข้มข้นของไอน้ำ

a,b = อันดับของปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นของแอลพีจีและไอน้ำตามลำดับ

ทำการทดลองการรีฟอร์มแก๊สแอลพีจีและไอน้ำ บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่อุณหภูมิ 1023 เคลวิน โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีและไอน้ำแตกต่างกันไป คือ การทดลองชุด A,B,...,I ตามลำดับ โดยแต่ละชุดการทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อมูลและผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 จากผลการทดลองแต่ละชุด เขียนกราฟระหว่างเศษส่วนน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนแก๊สแอลพีจี ($W/F_{0,LPG}$) กับเศษส่วนการเปลี่ยนแปลงของแก๊สแอลพีจี (X_{LPG}) จากสมการ

$$-r_{LPG} = X_{LPG} / (W/F_{0,LPG})$$

โดยที่

X_{LPG} = เศษส่วนการเปลี่ยนแปลงของแก๊สแอลพีจี ซึ่งนิยามโดยจำนวนโมลของคาร์บอนทั้งหมดในองค์ประกอบของแก๊สแอลพีจีที่ทำปฏิกิริยาต่อ จำนวนโมล

ของคาร์บอน ทั้งหมดในองค์ประกอบของแก๊สแอลพีจีที่ป้อนเข้า
 $W/F_{0,LPG} =$ เศษส่วนน้ำหนักตัวแรงปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนแก๊สแอลพีจี

จะได้ความชันเริ่มต้นเป็นอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี (r_{LPG}) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.9 และตารางที่ 4.3 และนำข้อมูลที่ได้นี้ไปหาอันดับของปฏิกิริยาโดยวิธี Multiple linear regression

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีและไอน้ำที่อุณหภูมิ 1023 องศาเซลวิน ของการทดลองที่ A ถึง I

การทดลองที่	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น(โมล/ม ³)ที่อุณหภูมิ 1023 เคลวิน		อัตราส่วน LPG:H ₂ O (โมล/ โมล)
	แก๊สแอลพีจี	ไอน้ำ	
A	1.072	8.694	1: 8.11
B	1.286	8.063	1: 6.27
C	1.513	7.372	1: 4.87
D	1.751	6.646	1: 3.80
E	1.775	8.371	1: 4.72
F	2.060	7.791	1: 3.78
G	2.084	8.480	1: 4.07
H	2.382	7.146	1: 3.00
I	2.918	7.110	1: 2.44

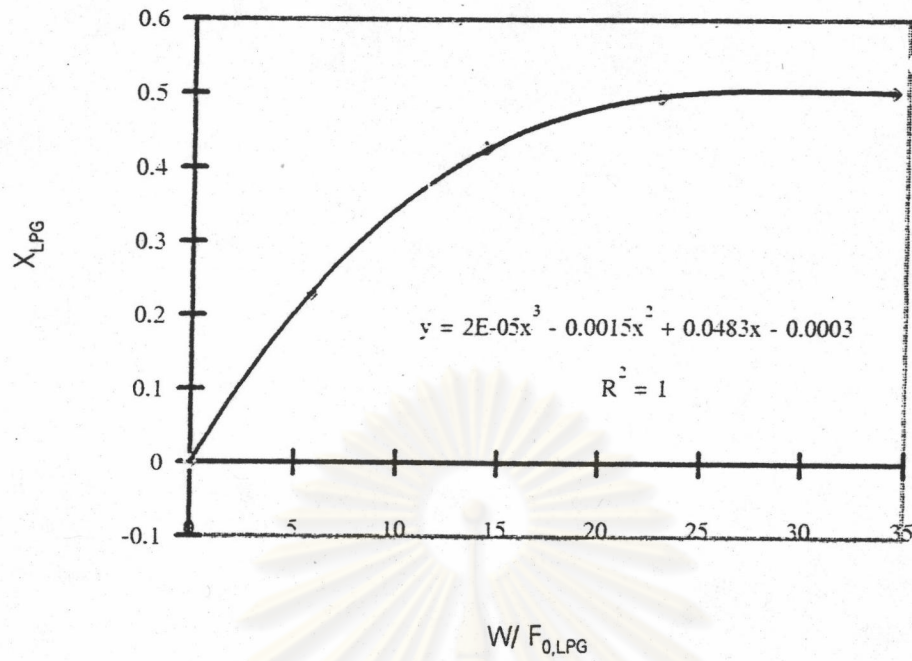
หมายเหตุ: รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.2 ค่า $W/F_{0,LPG}$ และเศษส่วนการเปลี่ยนแปลงของแก๊สแอลพีจี (X_{LPG})
การทดลองที่ A ถึง I

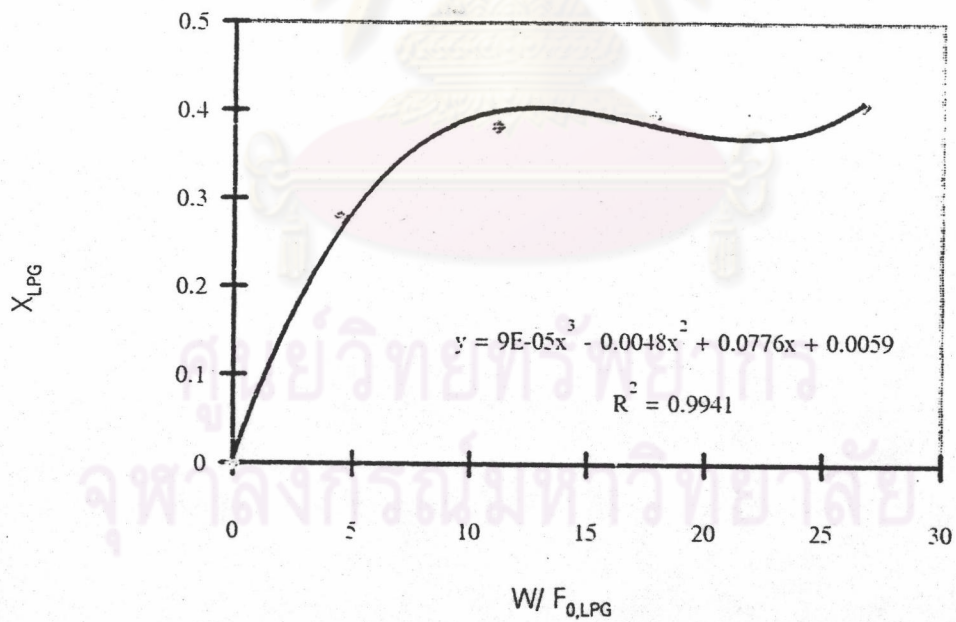
การทดลองที่	$W/F_{0,LPG}$ (กก.วินาที/ไมล)	เศษส่วนการเปลี่ยนแปลง(X_{LPG})
A1	5.71	0.149
A2	17.14	0.387
A3	28.57	0.497
A4	42.86	0.516
B1	4.44	0.153
B2	13.33	0.290
B3	22.22	0.521
B4	31.11	0.553
C1	3.33	0.234
C2	10.00	0.464
C3	16.67	0.600
C4	23.33	0.654
D1	4.44	0.202
D2	13.33	0.318
D3	22.22	0.399
D4	31.11	0.419
E1	2.86	0.302
E2	7.14	0.422
E3	11.43	0.493
E4	17.14	0.516

ตารางที่ 4.2(ต่อ) ค่า $W/F_{0,LPG}$ และเศษส่วนการเปลี่ยนแปลงของแก๊สแอลพีจี (X_{LPG})
การทดลองที่ A ถึง I

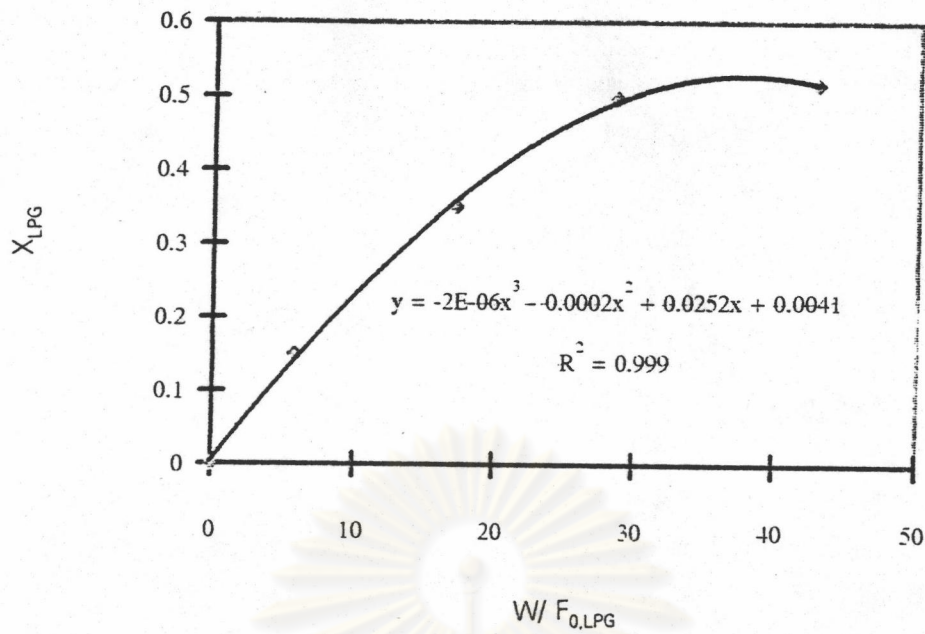
การทดลองที่	$W/F_{0,LPG}$ (กก.วินาที/ไมล)	เศษส่วนการเปลี่ยนแปลง(X_{LPG})
F1	5.71	0.228
F2	14.29	0.426
F3	22.86	0.496
F4	34.29	0.502
G1	4.44	0.279
G2	11.11	0.325
G3	17.78	0.378
G4	26.67	0.408
H1	3.33	0.303
H2	8.33	0.355
H3	13.33	0.387
H4	20.0	0.390
I1	2.86	0.355
I2	7.14	0.577
I3	11.43	0.594
I4	17.14	0.613



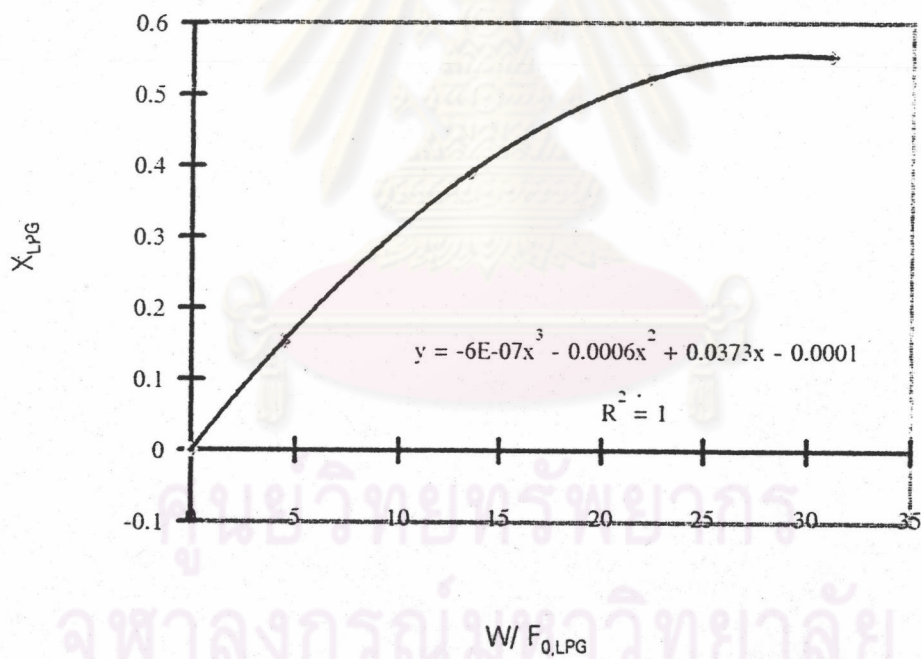
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ X_{LPG} เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง A



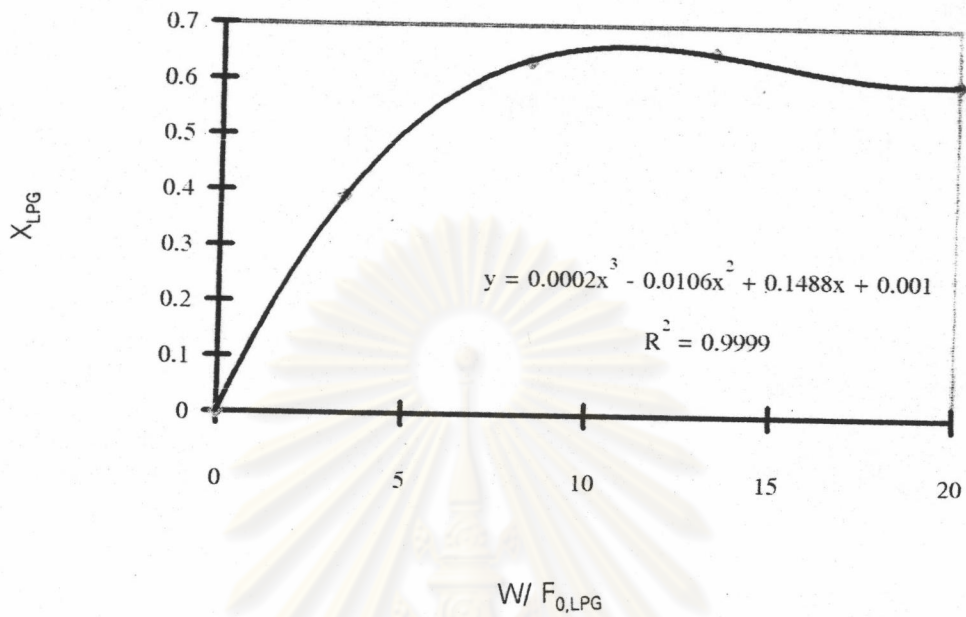
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ X_{LPG} เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง B



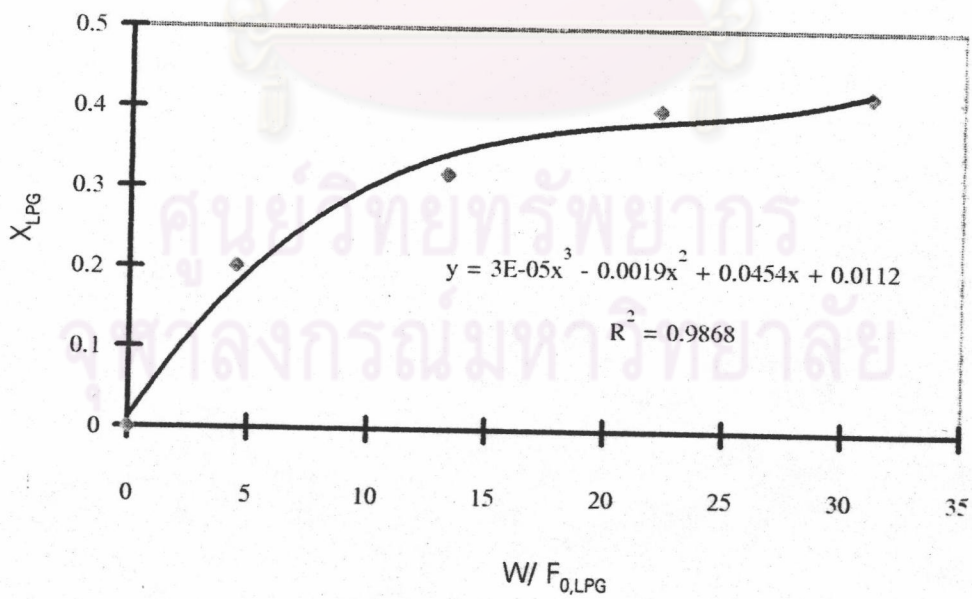
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง C



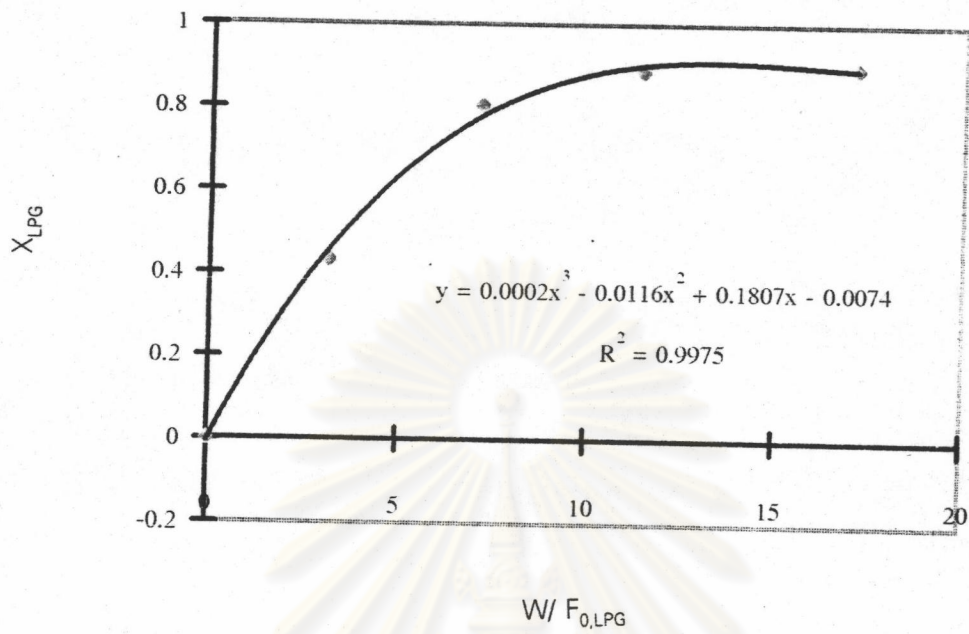
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง D



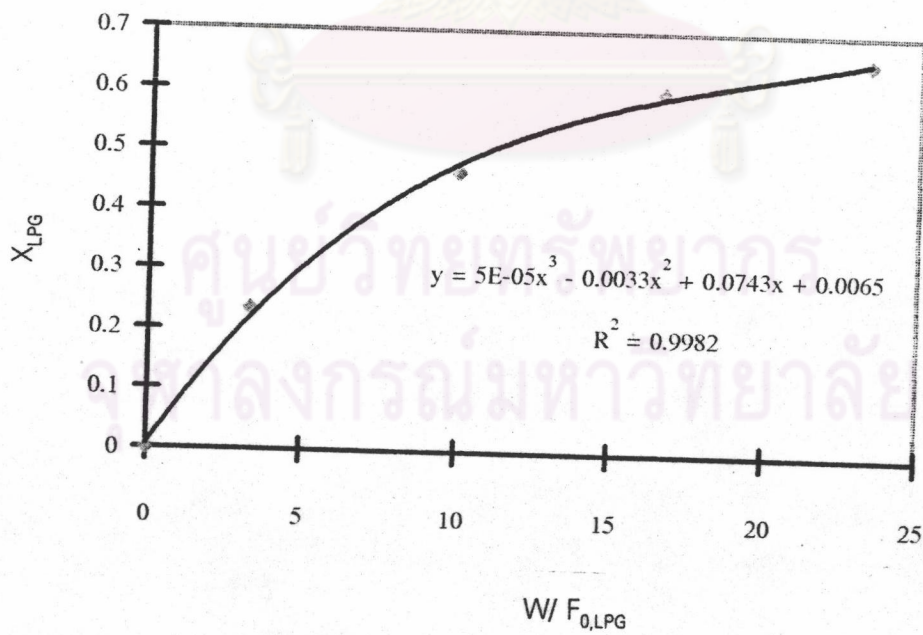
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง E



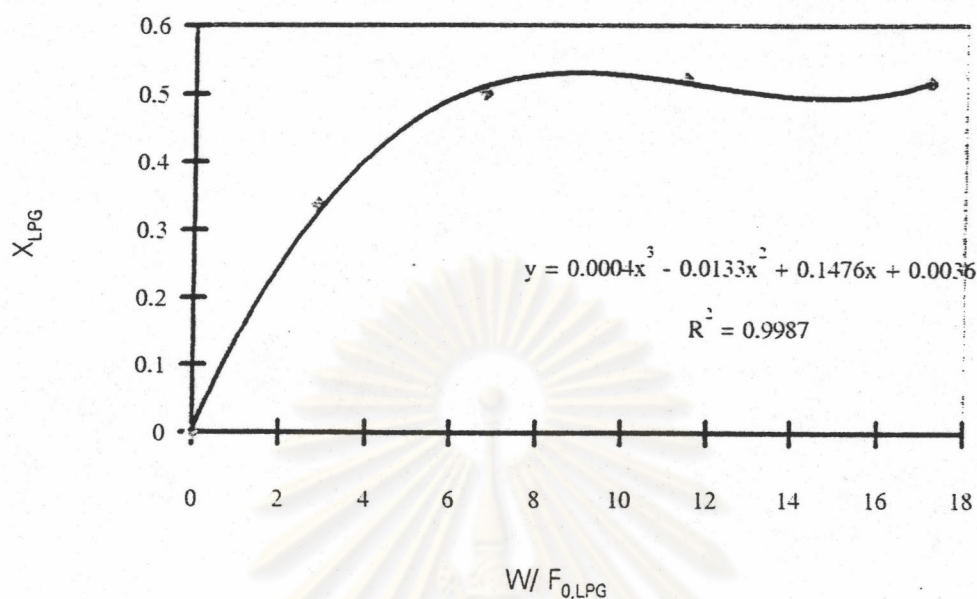
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง F



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง G



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง H



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง I

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีและไอน้ำที่อุณหภูมิ 1023 องศาเซลวิน และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ ($-r_{LPG}$)

การทดลองที่	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น(โมล/ม ³)ที่อุณหภูมิ 1023 เคลวิน		$-r_{LPG}$ (โมล/กก.วินาที)
	แก๊สแอลพีจี	ไอน้ำ	
A	1.072	8.694	0.0483
B	1.286	8.063	0.0776
C	1.513	7.372	0.0252
D	1.751	6.646	0.0373
E	1.775	8.371	0.1488
F	2.060	7.791	0.0454
G	2.084	8.480	0.1807
H	2.382	7.146	0.0743
I	2.918	7.110	0.1476

วิธีการ Multiple linear regression

จากสมการ $-r_{LPG} = k [LPG]^a [H_2O]^b$

ใส่ ln จะได้

$$\ln(-r_{LPG}) = \ln k + a \ln[LPG] + b \ln[H_2O]$$

เขียนรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

โดยที่

$$y = \ln(-r_{LPG})$$

$$a_0 = \ln k$$

$$a_1 = a$$

$$a_2 = b$$

$$x_1 = \ln[LPG]$$

$$x_2 = \ln[H_2O]$$

ตารางที่ 4.4 ค่า $\ln [LPG]$, $\ln [H_2O]$ และ $\ln [-r_{LPG}]$ ของการทดลองชุด A ถึง I

การทดลองที่	$\ln [LPG]$	$\ln [H_2O]$	$\ln [-r_{LPG}]$
A	0.414	1.998	-3.681
B	0.560	1.894	-3.289
C	0.868	1.967	-2.600
D	0.723	2.053	-3.092
E	1.071	1.962	-1.913
F	0.070	2.163	-3.030
G	0.252	2.087	-2.556
H	0.574	2.125	-1.905
I	0.734	2.138	-1.711

นำข้อมูลทั้งหมดจากตารางที่ 4.4 เข้าโปรแกรม Multiple linear regression ชื่อ Polymath จะได้

$$\ln(-r_{LPG}) = -15.37 + 1.9\ln[LPG] + 5.7\ln[H_2O]$$

ดังนั้น

$$\ln k = -15.37$$

$$k = 2.11 \times 10^{-8}$$

$$a = 1.9$$

$$b = 5.7$$

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณได้อันดับความเข้มข้นของแอลพีจีเท่ากับ 1.9 และอันดับความเข้มข้นของไอน้ำเท่ากับ 5.7 มีค่า k เท่ากับ 2.11×10^{-8} เมื่อเข้าสมการอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจีกับไอน้ำ เขียนได้เป็น

$$-r_{LPG} = k [LPG]^{1.9} [H_2O]^{5.7}$$

สมการข้างต้นมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.21 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า $\ln(-r_{LPG})$ จากข้อมูลทั้งหมด แสดงถึงเป็นสมการตัวแทนของข้อมูลที่คำนวณได้เป็นอย่างดี

การหาพลังงานกระตุ้น (E_a) และแฟกเตอร์ความถี่ (k_0)

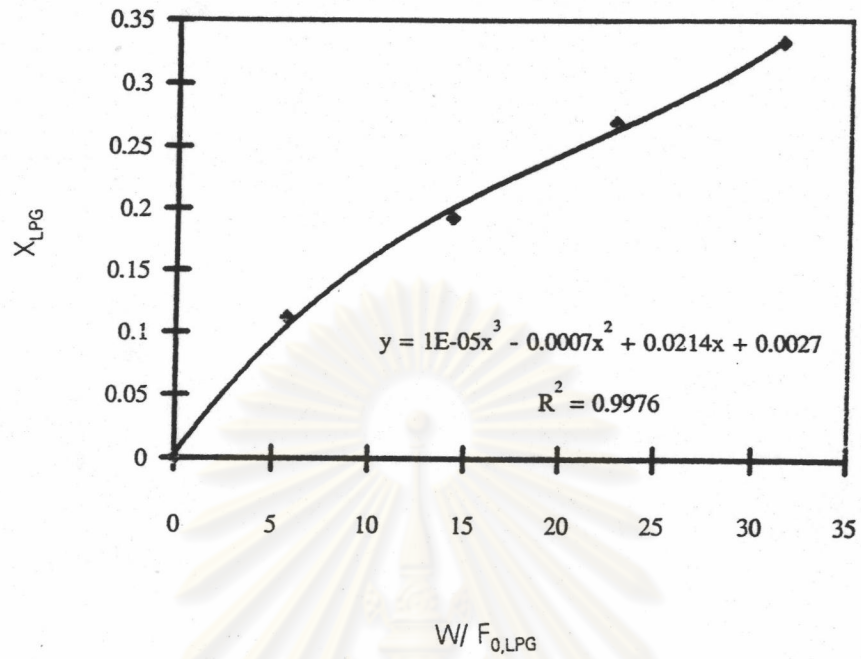
ทำการทดลองโดยทราบค่าความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีและไอน้ำ เปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิเป็น 973, 1023, 1073 และ 1123 เคลวิน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 นำค่าเศษส่วนน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนแก๊สแอลพีจี ($W/F_{0,LPG}$) ไปเขียนกราฟกับเศษส่วนการเปลี่ยนแปลงของแก๊สแอลพีจี (X_{LPG}) จะได้ความชันที่จุดเริ่มต้นเป็นอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 และตารางที่ 4.7 และคำนวณค่า k จากอัตราการทำปฏิกิริยา ($-r_{LPG}$) ที่ได้นี้ แล้วเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้ค่าความชันเป็นค่า $-E_a/R$ เท่ากับ -14,118 และจุดตัดแกน y เป็น $\ln k_0$ เท่ากับ -3 ดังนั้นคำนวณค่า E_a ได้เท่ากับ 117.4 kJ/mol และ k_0 เท่ากับ $0.05 \text{ mol}^{-7.6} (\text{m})^{3.8.6} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่อุณหภูมิต่างๆของการทดลองที่ W ถึง Z

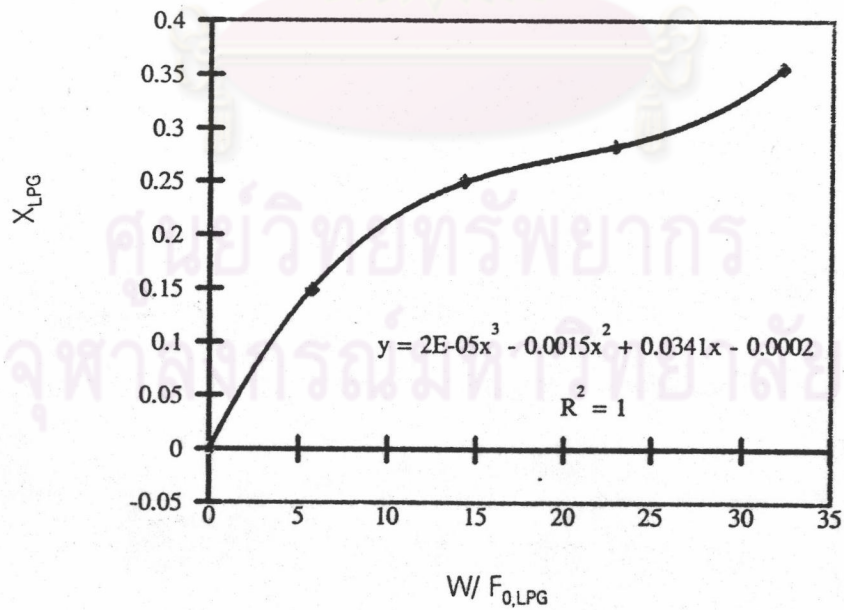
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (โมล/ม ³) ที่อุณหภูมิ ต่างๆ	
		แก๊สแอลพีจี	ไอน้ำ
W	973	1.59	7.75
X	1023	1.51	7.37
Y	1073	1.44	7.03
Z	1123	1.38	6.72

ตารางที่ 4.6 ค่า $W/F_{0,LPG}$ และเศษส่วนการเปลี่ยนแปลงของแก๊สแอลพีจี (X_{LPG}) การทดลองที่ W ถึง Z

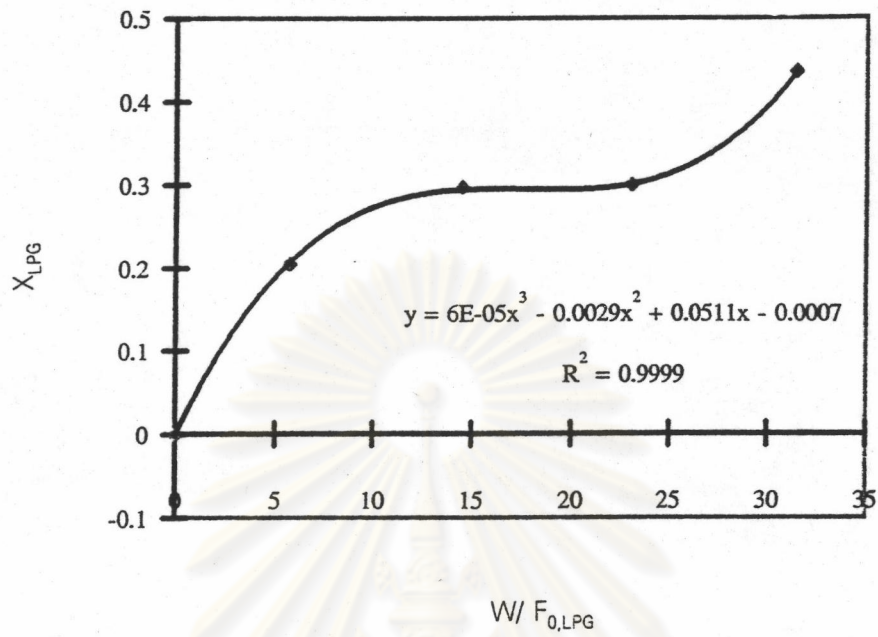
การทดลองที่	$W/F_{0,LPG}$ (กก.วินาที/โมล)	เศษส่วนการเปลี่ยนแปลง(X_{LPG})
W1	5.71	0.105
W2	14.29	0.156
W3	22.86	0.275
W4	31.43	0.336
X1	5.71	0.149
X2	14.29	0.176
X3	22.86	0.276
X4	31.43	0.380
Y1	5.71	0.204
Y2	14.29	0.296
Y3	22.86	0.299
Y4	31.43	0.436
Z1	5.71	0.287
Z2	14.29	0.410
Z3	22.86	0.372
Z4	31.43	0.513



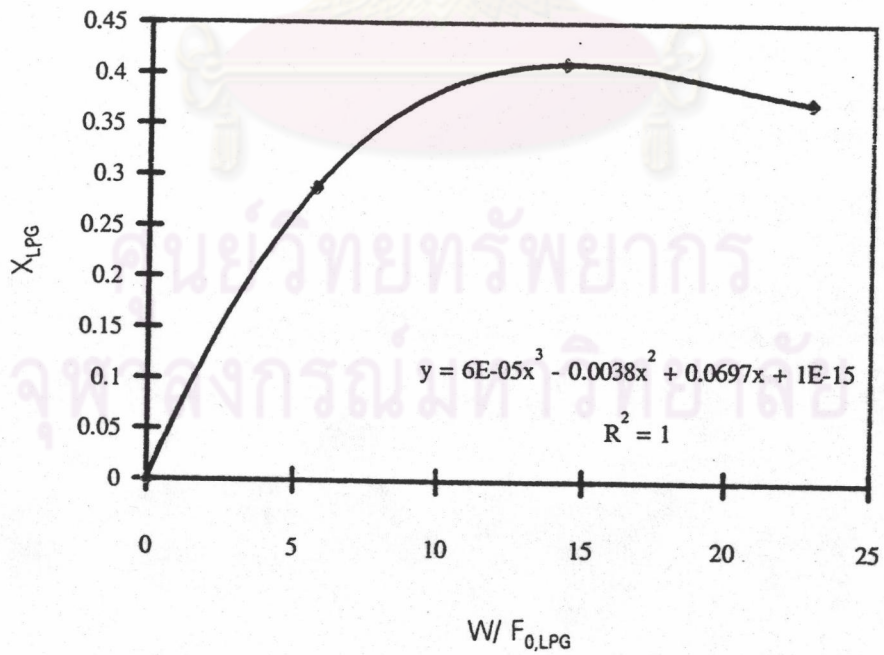
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง W



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง X



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง Y

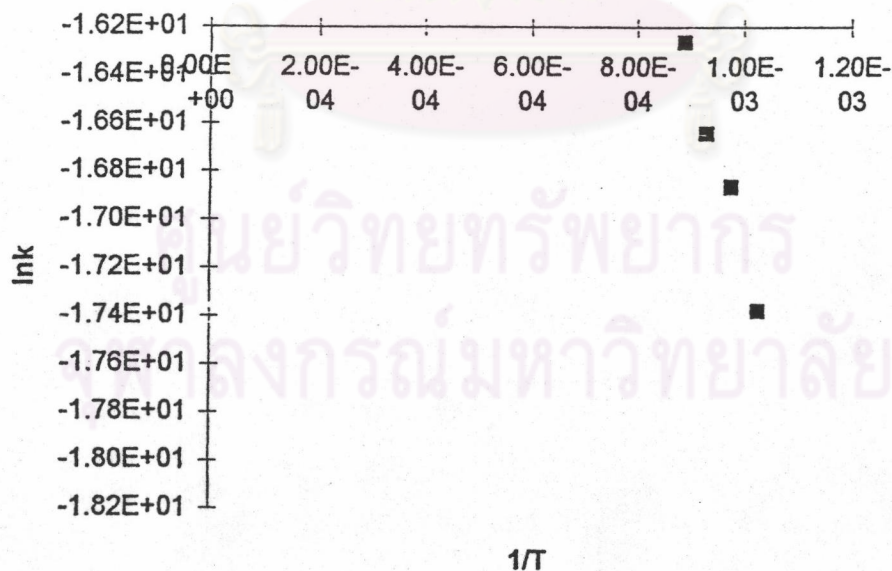


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $W/F_{0,LPG}$ และ (X_{LPG}) เพื่อหาค่า $-r_{LPG}$ ของการทดลอง Z

ตารางที่ 4.7 อัตราการทำปฏิกิริยาของแอลพีจี ค่า k ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อทำการทดลอง เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$-r_{LPG}$ (โมล/กก.วินาที)	k ($\times 10^{-8}$)	$\ln k$	$1/T$ ($\times 10^{-4}$)
W	973	0.024	1.85	-17.805	10.30
X	1023	0.040	4.77	-16.858	9.78
Y	1073	0.050	8.96	-16.228	9.32
Z	1123	0.073	19.20	-15.466	8.90

หมายเหตุ ค่า k คำนวณจากสมการ $-r_{LPG} = k [LPG]^{1.9} [H_2O]^{5.7}$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/T$ กับ $\ln k$ เพื่อหา E_a และ k_0

การหาสมการอัตราเร็วโดยวิธีไอโซเลต (isolate method)

การทดลองชุด M ถึง T เป็นการทดลองเพื่อหาอันดับของความเข้มข้นของแอลพีจีโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 1023 องศาเซลวิน และน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา เท่ากับ 2 กรัม โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีตั้งแต่ 0.333 ถึง 0.736 โมล/ม³ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของไอน้ำมากเกินไปซึ่งมีค่าที่ 10.603 ถึง 10.981 โมล/ม³ ผลการทดลองดังตารางที่ 4.8 และจากข้อมูลการทดลองนำมาคำนวณหาอัตราการทำปฏิกิริยาของแอลพีจีและคำนวณหา [LPG]^a โดยให้ a มีค่าเป็น 1,2,2.2 และ 2.5 ดังตารางที่ 4.9 เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีอันดับต่างๆกับอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ได้ดังรูป 4.16 ถึง 4.19 จากกราฟรูป 4.17 พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มผ่านจุดกำเนิด โดยมีความเข้มข้นของแอลพีจียกกำลังสองแสดงว่า ปฏิกิริยาการรีฟอร์มแก๊สแอลพีจีด้วยไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาอันดับสองของความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจี

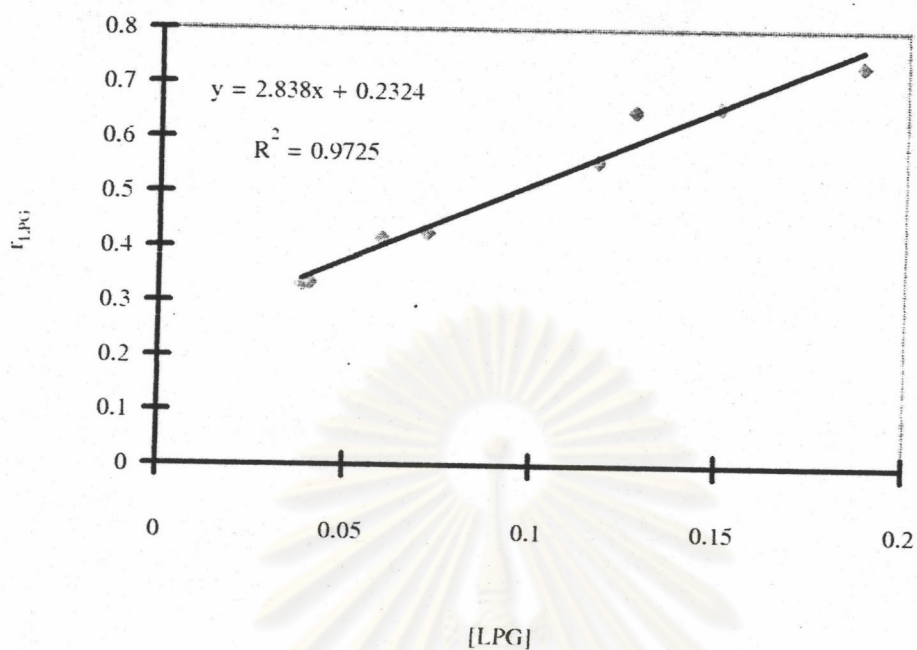
ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีและไอน้ำที่อุณหภูมิ 1023 องศาเซลวินและอัตราการป้อนแก๊สแอลพีจี ($F_{0,LPG}$) ของการทดลองชุด M ถึง T

การทดลองชุด	$F_{0,LPG} (x10^{-4})$ (mol/s)	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (mol/m ³) ที่ 1023 เคลวิน	
		แก๊สแอลพีจี	ไอน้ำ
M	3.62	0.333	10.981
N	3.62	0.331	10.921
O	4.50	0.414	10.671
P	4.50	0.424	10.897
Q	6.00	0.557	10.773
R	7.03	0.650	10.685
S	7.03	0.659	10.830
T	8.04	0.736	10.603

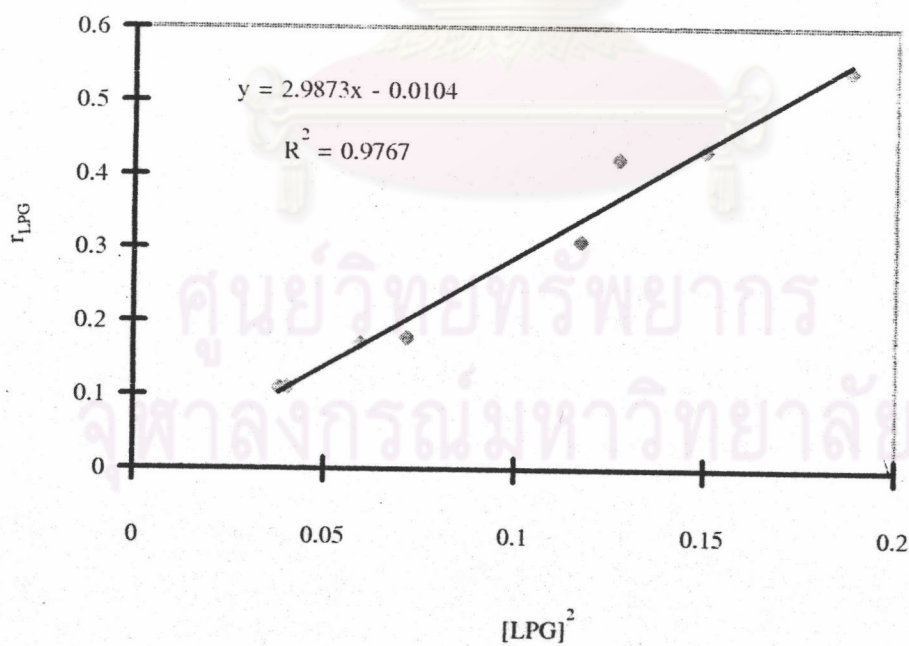
ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจีอันดับต่างๆและอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ($-r_{LPG}$)

การทดลองชุด	เศษส่วนการเปลี่ยนแปลง (X_{LPG})	$W/F_{0,LPG}$ (กก.วินาที/โมล)	$-r_{LPG} = X_{LPG}/(W/F_{0,LPG})$ (โมล/กก.วินาที)	ความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจี, [LPG](mol/m ³)ที่ 1023K			
				[LPG]	[LPG] ²	[LPG] ^{2.2}	[LPG] ^{2.5}
M	0.221	5.52	0.0402	0.333	0.111	0.0890	0.064
N	0.211	5.52	0.0382	0.331	0.110	0.0878	0.063
O	0.263	4.44	0.0592	0.414	0.171	0.144	0.110
P	0.317	4.44	0.0714	0.424	0.179	0.151	0.117
Q	0.390	3.33	0.117	0.557	0.310	0.276	0.232
R	0.422	2.86	0.127	0.650	0.423	0.388	0.341
S	0.428	2.86	0.150	0.659	0.434	0.396	0.353
T	0.469	2.50	0.188	0.736	0.542	0.509	0.465

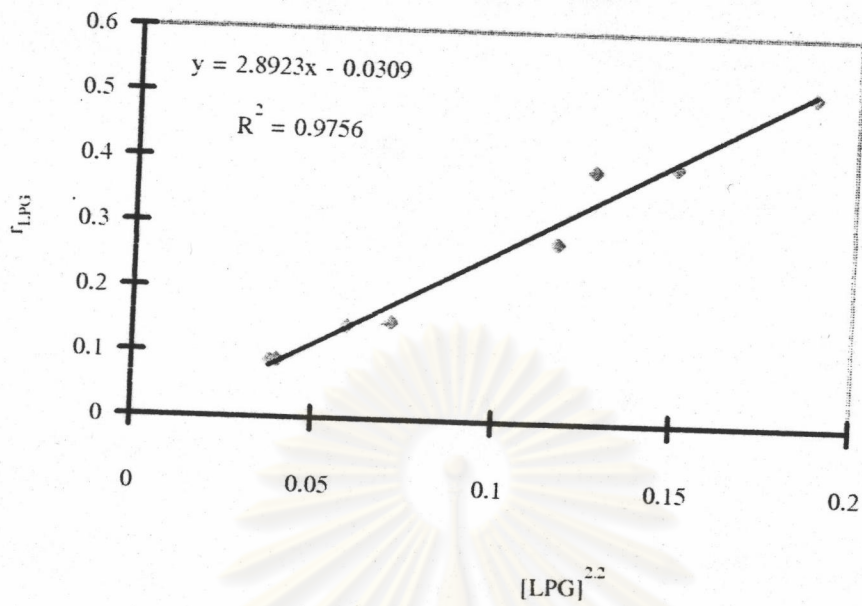
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



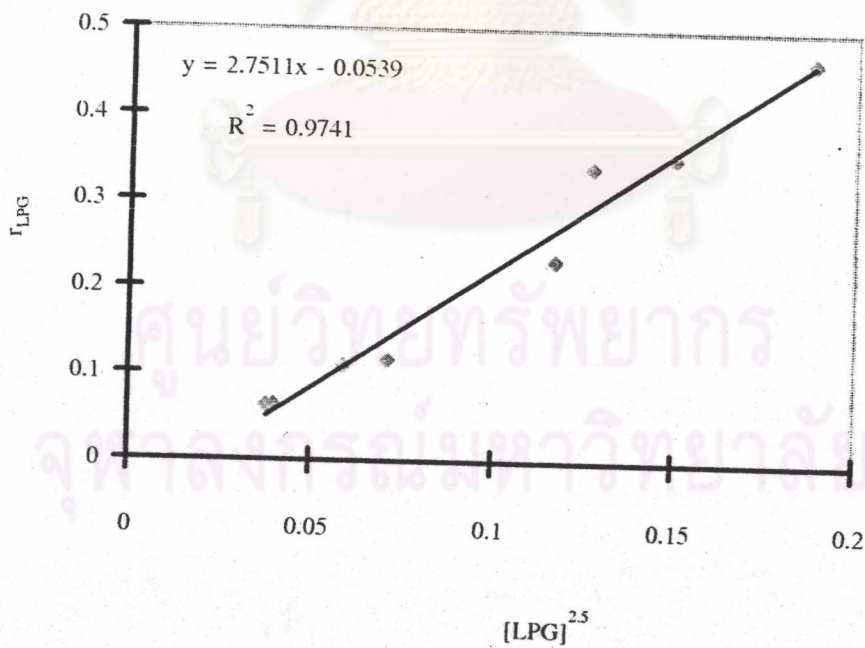
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ($-\Gamma_{LPG}$) กับความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจียกกำลังหนึ่ง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ($-\Gamma_{LPG}$) กับความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจียกกำลัง 2



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ($-r_{LPG}$) กับความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจียกกำลัง 2.2



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำปฏิกิริยาของแก๊สแอลพีจี ($-r_{LPG}$) กับความเข้มข้นของแก๊สแอลพีจียกกำลัง 2.5