

การทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการประยุกต์  
ในการถ่ายโอนความร้อน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREDICTION OF HYBRID NANOFUID PROPERTIES USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK  
AND HEAT TRANSFER APPLICATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการประยุกต์ในการถ่ายโอนความร้อน
โดย	นายสหัสวัต แซวรัมย์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถлимสินสุวรรณ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.คณศ วงษ์ระวี)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถлимสินสุวรรณ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร สรรพอคำ)	



# # 6370029823 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Hybrid nanofluid artificial neural network

Sahatsawat Seawram : PREDICTION OF HYDRID NANOFLUID PROPERTIES  
USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND HEAT TRANSFER APPLICATION.

Advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D.

Currently, many industries aim to improve the heat transfer system to reduce cost and carbon emission. For improving heat exchanger apparatus, the conventional working fluid such as water can be replaced by hybrid nanofluid. The hybrid nanofluid is a suspension of two or more nanoparticles into conventional base fluids to improve its properties. Generally, different combinations of nanoparticle and base fluid can variably effect the thermal properties and dynamic properties. In this study, the artificial neural network was thus employed to develop the prediction model for predicting thermal conductivity, specific heat capacity, viscosity, and density using feedforward and cascade forward propagation networks with Levenbreg-Marquardt learning algorithm. The best artificial neural network (ANN) model topology was selected to predict thermal conductivity, specific heat capacity, viscosity, and density of hybrid nanofluid with R value >0.90 for training, validating and testing, respectively. Then, the thermal properties of hybrid nanofluid value from ANN model was applied as heat transfer agent in heat exchanger of isopropyl alcohol process. The hybrid nanofluid with CuO and MgO in water exhibited the best heat removing medium in heat exchanger application to obtain highest concentration of isopropyl alcohol.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการประยุกต์ใช้ในการถ่ายโอนความร้อน สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และช่วยเหลืออย่างสูงจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำการทํางานวิจัย และข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัย เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. คณศ วังษ์ระวี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิวัฒน์ เสมมา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร สรรพอคำ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ และให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และ เจ้าหน้าที่ทุกท่านในสหสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้และอำนวยความสะดวก ในการวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.ปรารธนา นิมมานเทอดวงศ์ และ ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง ที่ถ่ายทอดความรู้และให้คำปรึกษาเกี่ยวข้องกับ การดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ตลอดจน พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังและได้ให้กำลังใจ คำปรึกษา และสนับสนุนในด้านต่าง ๆ แก่ผู้ทำวิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สหัสวัต แช่วรัมย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ข้อยกเว้นงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย .....	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	9
2.1 ของไหลไฮบริดนาโน .....	9
2.2 คุณสมบัติของของไหลไฮบริด.....	9
2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) .....	10
2.2.1 นิยาม.....	10
2.2.2 ส่วนประกอบ .....	10
2.2.3 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function).....	10

2.5.4 ประเภทโครงข่ายประสาทเทียม.....	12
2.4 การจำลองกระบวนการในการถ่ายโอนความร้อน .....	14
2.4.1 หลักการคำนวณ .....	14
2.4.2 ขั้นตอนการใช้งาน .....	16
2.5 การเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen plus .....	17
2.6 การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปรในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ .....	18
2.7 การออกแบบการทดลอง.....	19
2.7.1. แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Singer factor design).....	19
2.7.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design).....	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	22
3.1 ศึกษาคุณสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน .....	22
3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน .....	22
3.2 การเก็บข้อมูลคุณสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน.....	23
3.2.1 การเก็บข้อมูลค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน .....	23
3.2.2 การเก็บข้อมูลความจุความร้อนจำเพาะของของไหลไฮบริดนาโน .....	25
3.2.3 การเก็บข้อมูลความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน.....	27
3.2.4 การเก็บข้อมูลความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน.....	29
3.3 ออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม.....	30
3.4 การประเมินโครงข่ายประสาทเทียม .....	32
3.4.1 ค่า R.....	33
3.4.2 ค่า MSE.....	33
3.4.3 ค่า MAE .....	34
3.5 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน.....	35



3.6 การประยุกต์ใช้การถ่ายโอนความร้อนในโปรแกรม Aspen plus .....	39
3.6.1 การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม .....	39
3.6.2 การเพิ่มคุณสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน.....	39
3.7 การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปรในกระบวนการผลิต .....	43
3.7.1 การทดสอบความอ่อนไหวด้วยโปรแกรม Aspen plus .....	44
3.7.2 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design expert.....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	47
4.1 ผลการหาจำนวนนิรอรอน ที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม.....	47
4.2 ผลการหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม .....	50
4.3 ผลการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์สมบัติทางความร้อนของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen plus.....	59
4.4 ผลการประยุกต์ใช้การถ่ายโอนความร้อนในโปรแกรม Aspen plus.....	61
4.5 ผลการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Design expert .....	64
4.5.1. ผลการวิเคราะห์ (Analysis) ทางสถิติ .....	64
4.5.2. ผลการหาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization).....	85
4.6 การหาความดันลดภายในท่อ .....	101
4.6.1 การหาจำนวนเรย์โนลด์ (Re number).....	101
4.6.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction loss).....	102
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	105
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	105
บรรณานุกรม.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	115
ภาคผนวก ก.....	116
1. การเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen Plus.....	116

2. การทดสอบความอ่อนไหวในโปรแกรม Aspen plus .....	120
ภาคผนวก ข.....	122
1. ค่า $W_i$ และ $b$ ของโครงข่ายประสาทเทียมของค่าการนำความร้อน.....	122
2. ค่า $W_i$ และ $b$ ของโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความร้อนจำเพาะ .....	124
3. ค่า $W_i$ และ $b$ ของโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความหนืด.....	126
4. ค่า $W_i$ และ $b$ ของโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความหนาแน่น.....	128



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออก ของการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน...	3
ตารางที่ 1.2	ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออก ของความจุความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน...	4
ตารางที่ 1.3	ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออก ของความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน .....	5
ตารางที่ 1.4	ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออกของ ความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน .....	6
ตารางที่ 1.5	ข้อกำหนดของโครงข่ายประสาทเทียม .....	7
ตารางที่ 1.6	ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ณ หอกลับัน .....	8
ตารางที่ 2.1	ตัวแปรต้นสำหรับทดสอบความอ่อนไหว .....	18
ตารางที่ 2.2	ตัวแปรตอบสนองสำหรับทดสอบความอ่อนไหว .....	18
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลค่าการนำความร้อน .....	23
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลความจุความร้อนจำเพาะ .....	25
ตารางที่ 3.3	ข้อมูลความหนืด .....	27
ตารางที่ 3.4	ข้อมูลความหนาแน่น.....	29
ตารางที่ 3.5	ส่วนประกอบของไหลไฮบริดนาโน .....	36
ตารางที่ 3.6	ค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริด.....	37
ตารางที่ 3.7	ค่าสัมประสิทธิ์ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel .....	40
ตารางที่ 3.8	ปัจจัยที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA และปริมาณมาณความร้อนที่ (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน .....	43
ตารางที่ 3.9	ตัวแปรตอบสนองสำหรับทดสอบความอ่อนไหว.....	44
ตารางที่ 4.1	ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายการนำความร้อนของ ของไหล ไฮบริดนาโน.....	51
ตารางที่ 4.2	สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายการนำความร้อนของของไหลไฮบริด นาโน.....	52

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความจุความร้อนจำเพาะของของไหลไฮบริดนาโน.....	53
ตารางที่ 4.4 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความจุความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน.....	54
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนืดของ ของไหลไฮบริดนาโน.....	55
ตารางที่ 4.6 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนืดของ ของไหลไฮบริดนาโน.....	56
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนาแน่นของ ของไหลไฮบริดนาโน.....	57
ตารางที่ 4.8 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนาแน่น ของของไหลไฮบริดนาโน.....	58
ตารางที่ 4.9 ค่าควบคุมของสายป้อน และผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิต IPA.....	62
ตารางที่ 4.10 ค่าควบคุมของหอกลับลำดับส่วน (DISTIL-1) ของกระบวนการผลิต IPA.....	62
ตารางที่ 4.11 ค่าควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HEATX-1) ของกระบวนการผลิต IPA.....	63
ตารางที่ 4.12 ค่าควบคุมเครื่องแยก (SP2) ของกระบวนการผลิต IPA .....	63
ตารางที่ 4.13 ค่ามาตรฐานสำหรับกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่ 99.948%.....	63
ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลพื้นฐาน ต่อความบริสุทธิ์ IPA .....	64
ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต่อ ปริมาณความร้อน (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	66
ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต่อความบริสุทธิ์ IPA.....	68
ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อปริมาณความร้อน (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	70
ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อความบริสุทธิ์ IPA .....	72

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) สำหรับเครื่อง  
แลกเปลี่ยนความร้อนต่อปริมาณความร้อน (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ..... 74

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยน  
ความร้อนที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA..... 76

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยน  
ความร้อนที่มีผลต่อปริมาณความร้อน Q ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ..... 78

ตารางที่ ข.1 ค่า W<sub>1</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าการนำความร้อน..... 122

ตารางที่ ข.2 ค่า W<sub>2</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 2 และชั้นส่งออก ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าการนำ  
ความร้อน ..... 123

ตารางที่ ข.3 ค่า W<sub>1</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความร้อนจำเพาะ ..... 124

ตารางที่ ข.4 ค่า W<sub>2</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 2 และชั้นส่งออก ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความร้อน  
จำเพาะ ..... 125

ตารางที่ ข.5 ค่า W<sub>1</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความหนืด..... 126

ตารางที่ ข.6 ค่า W<sub>2</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 2 และชั้นส่งออก ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความหนืด  
..... 127

ตารางที่ ข.7 ค่า W<sub>1</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความหนาแน่น..... 128

ตารางที่ ข.8 ค่า W<sub>2</sub> และ b ของชั้นช่องทางที่ 2 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความหนาแน่น..... 129

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม.....	6
รูปที่ 1.2 รูปแบบกระบวนการผลิตไอโซโทปโพแทสเซียม.....	8
รูปที่ 2.1 ลักษณะของฟังก์ชันกระตุ้น.....	10
รูปที่ 2.2 ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเส้นตรง.....	11
รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบซิกมอยด์.....	11
รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์.....	12
รูปที่ 2.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้า.....	13
รูปที่ 2.6 โครงข่ายประสาทข้างหน้าและด้านข้างพร้อมกัน.....	13
รูปที่ 3.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายการนำความร้อน.....	30
รูปที่ 3.2 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความจุความร้อนจำเพาะ.....	31
รูปที่ 3.3 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนาแน่น.....	31
รูปที่ 3.4 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนืด.....	32
รูปที่ 3.5 ลักษณะ Linear regression.....	33
รูปที่ 3.6 การสร้างสารประกอบใหม่.....	40
รูปที่ 3.7 การใส่ค่าตัวแปร.....	41
รูปที่ 3.8 การใส่น้ำหนักโมเลกุล.....	41
รูปที่ 3.9 ผลของค่าการนำความร้อนเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ.....	42
รูปที่ 4.1 กราฟค่า R ต่อจำนวนนิเวศของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่หนึ่ง.....	47
รูปที่ 4.2 กราฟค่า MSE ต่อจำนวนนิเวศของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่หนึ่ง.....	48
รูปที่ 4.3 กราฟค่า R ต่อจำนวนนิเวศของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่สอง.....	49
รูปที่ 4.4 ค่า MSE ต่อจำนวนนิเวศของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่สอง.....	49

รูปที่ 4.5 กราฟค่า $R^2$ ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของการนำความร้อน	52
รูปที่ 4.6 กราฟค่า $R^2$ ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของความจุความร้อนจำเพาะ	54
รูปที่ 4.7 กราฟค่า $R^2$ ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของความหนืด	56
รูปที่ 4.8 กราฟค่า $R^2$ ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของความหนาแน่น	58
รูปที่ 4.9 กราฟวิเคราะห์ค่า $R^2$ ค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากสมการของ ของไหลไฮบริดนาโนที่ 1 (MWCNT+ CuO)	59
รูปที่ 4.10 กราฟวิเคราะห์ค่า $R^2$ ค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากสมการของ ของไหลไฮบริดนาโนที่ 2 (MWCNT+ $Fe_3O_4$ )	59
รูปที่ 4.11 กราฟวิเคราะห์ค่า $R^2$ ค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากสมการของ ของไหลไฮบริดนาโนที่ 3 (CuO+ MgO)	60
รูปที่ 4.12 กระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	61
รูปที่ 4.13 อัตราการไหลผลิตภัณฑ์ส่วนล่างส่งผลต่อความบริสุทธิ์ IPA	80
รูปที่ 4.14 การไหลวัตถุดิบป้อนที่ 2 ที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ IPA	81
รูปที่ 4.15 Reflux ratio ที่ส่งผลต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	82
รูปที่ 4.16 Bottom rate ที่ส่งผลต่อความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	83
รูปที่ 4.17 Interaction AB ที่มีผลต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	84
รูปที่ 4.18 ผลของตัวแปร B และ E ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	85
รูปที่ 4.19 Interaction BE ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA	86
รูปที่ 4.20 ผลของตัวแปร B และ E ต่อความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	87
รูปที่ 4.21 Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของ IPA	88
รูปที่ 4.22 ผลของตัวแปร B และ E ต่อ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ $Fe_3O_4$ )	89

รูปที่ 4.23 Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของ IPA .....	90
รูปที่ 4.24 ผลของตัวแปร B และ E ต่อความบริสุทธิ์ของ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	91
รูปที่ 4.25 Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของ IPA .....	92
รูปที่ 4.26 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) เมื่อใช้ของไหลพื้นฐาน สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	93
รูปที่ 4.27 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน(Q) ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	94
รูปที่ 4.28 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	95
รูปที่ 4.29 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	96
รูปที่ 4.30 ผลของตัวแปร B และ E ต่อปริมาณ (Q) และความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลพื้นฐาน สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	97
รูปที่ 4.31 ผลของตัวแปร B และ E ต่อปริมาณความร้อน (Q) และ ความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO).....	98
รูปที่ 4.32 ผลของตัวแปร B และ E ต่อปริมาณความร้อน (Q) และ ความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ).....	99
รูปที่ 4.33 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) และ ความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) .....	100
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความดันลระหว่างของไหลพื้นฐาน และของไหลไฮบริดนาโนที่ 84 kg/sec .....	103
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความดันลระหว่างของไหลพื้นฐาน และของไหลไฮบริดนาโนที่ 92 kg/sec .....	104
รูปที่ ก.1 การสร้างสารประกอบใหม่.....	116



รูปที่ ก.2 การใส่ค่าตัวแปร.....	116
รูปที่ ก.3 การระบุองค์ประกอบสารประกอบใหม่ .....	117
รูปที่ ก.4 แสดงการใส่น้ำหนักโมเลกุล.....	117
รูปที่ ก.5 การตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบ .....	118
รูปที่ ก.6 ค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน .....	118
รูปที่ ก.7 การเพิ่มไฮบริดนาโนสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	119
รูปที่ ก.8 การใส่ค่าอุณหภูมิและความดันของของไหลไฮบริดนาโน .....	119
รูปที่ ก.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร .....	120
รูปที่ ก.10 การเพิ่มตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ความอ่อนไหว.....	120
รูปที่ ก.11 การเพิ่มตัวแปรตอบสนอง.....	121
รูปที่ ก.12 การใส่ค่าตัวแปร.....	121

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบอุตสาหกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ อุตสาหกรรม [1] เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า โดยต้องการออกแบบระบบนิเวศทางธุรกิจให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มุ่งเน้นลดการใช้พลังงานและลดการปลดปล่อยคาร์บอน ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อน โดยระบบอุตสาหกรรมที่กล่าวมาข้างต้นจะมีระบบแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้นจะสามารถลดการใช้พลังงานของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การใช้ตัวกลางที่มีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น ช่วยลดการใช้พลังงานของปั๊มที่ใช้สำหรับหมุนเวียนตัวกลางกับการใช้ตัวกลางที่มีส่วนประกอบที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการนำความร้อนที่แตกต่างกัน

กระบวนการปัจจุบันใช้ของไหลเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน คือ น้ำ และน้ำผสมน้ำมันเอทิลีนไกลคอล ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำ [2] การเติมอนุภาคนาโนที่มีค่าการนำความร้อนสูงกว่า ได้แก่ กลุ่มโลหะ อลูมิเนียม (Al) เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) กลุ่มโลหะออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ไททาเนียมออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO_2$ ) กลุ่มพอลิเมอร์ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNT) และ แกรฟีน (Graphene) ซึ่งสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนจะขึ้นกับตัวแปรหลายตัวแปร เช่น ชนิดของอนุภาคนาโน ขนาดของอนุภาคนาโน การนำความร้อนของอนุภาคนาโน ปริมาณของอนุภาคนาโนที่ใช้ และชนิดของของไหลพื้นฐานที่ใช้ เป็นต้น การเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนให้สูงขึ้น ส่งผลให้การใช้ระบบหล่อเย็นและขนาดของเครื่องสูบลดลง ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการลงได้ ต่อมาการศึกษาสมบัติทางความร้อนของของไหลผสมนาโน มีการพัฒนาโดยการเติมอนุภาคนาโนมากกว่าสองชนิดลงในของไหลพื้นฐาน เรียกว่า ของไหลไฮบริดนาโน เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างของไหลไฮบริดนาโน โดย Sajid และคณะ [3] ได้ศึกษาการเตรียมของไหลไฮบริดนาโนประเภทต่าง ๆ ด้วย กลุ่มโลหะออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) คอปเปอร์ไดออกไซด์ ( $CuO_2$ ) ท่อนาโนคาร์บอนนาโน (CNTs) ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) อลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) และ กลุ่มโลหะ ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) เงิน (Ag) และทองแดง (Cu) โดยศึกษา

เสถียรภาพของของไหลไฮบริดนาโนจากการเตรียม หลังจากนั้นจึงนำของไหลไฮบริดนาโนไปวัดสมบัติทางความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติที่สนใจคือ การนำความร้อน (Thermal conductivity) หรือ ค่าที่แสดงความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อนของวัสดุ สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ  $k$  มีหน่วยเป็น  $W/(m.K)$  ความหนาแน่น (Density) ซึ่งแสดงถึงน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ  $\rho$  มีหน่วยคือ  $g/cm^3$  ความหนืด (Viscosity) โดยมีสัญลักษณ์ที่ใช้ คือ  $\eta$  ในระบบ SI มีหน่วยเป็น  $mPa.s$  และ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ใช้สัญลักษณ์ คือ  $C_p$  มีหน่วยเป็น  $kJ/(kg K)$

งานวิจัยนี้ต้องการนำค่าการไหลและสมบัติความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรมจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของของไหลไฮบริดนาโนที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านบนหอกลั่นของกระบวนการกลั่นไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความอ่อนไหวของการนำค่าการนำสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ค่าความเข้มข้นของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และค่าความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) สร้างสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
- 2) ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนในการถ่ายโอนความร้อน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) สร้างสหสัมพันธ์ที่สามารถใช้ทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโนได้
- 2) ศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนของอนุภาคนาโนที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน
- 3) นำสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโนไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายโอนความร้อน

#### 1.4 ข้อจำกัดงานวิจัย

- 1) ช่วงข้อมูลที่ป้อนอยู่ในช่วงตามตารางที่ 1.1
- 2) สามารถทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโนเกินในช่วงค่าจำกัดตามตารางที่ 1.1

#### 1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย

- 1) อนุภาคนาโน (Nanoparticle) ของแข็งที่มีขนาดไม่เกิน 100 ไมโครเมตร
- 2) ของไหลไฮบริดนาโน (Hybrid nanofluid) ของไหลพื้นฐานหนึ่งหรือสองชนิด ผสมกับอนุภาคนาโนมากกว่าสองชนิด

#### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน การประยุกต์ใช้ในการถ่ายโอนความร้อน
- 2) วางแผนงานวิจัย จัดเก็บข้อมูลการนำความร้อน ความจุความร้อน ความหนืด และความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ แปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน ตามตารางที่ 1.1 ตารางที่ 1.2 ตารางที่ 1.3 ตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.1 ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออก ของการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน

ตัวแปรป้อน	ช่วงข้อมูล	หน่วย
อัตราส่วนของน้ำ	0.00, 0.50, 0.60, 0.70, 1.00	Fraction
การนำความร้อนของน้ำ	0.60	W/(m.K)
อัตราส่วนน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	0.00, 0.30, 0.40, 0.50, 1.00	Fraction
การนำความร้อนของน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	0.26	W/(m.K)
อุณหภูมิ	288.15-363.15	K
ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน	0.00-10.00	% Vol
อนุภาคนาโนที่ 1	Ag, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , GO, MgO, MWCNT, SWCNT, SiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , TiN, TiO <sub>2</sub> , ZnO	-
สัดส่วนอนุภาคนาโนที่ 1	0.20, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 0.90, 1.00	Fraction
การนำความร้อนอนุภาคนาโนที่ 1	1.42- 3500	W/(m.K)
อนุภาคนาโนที่ 2	MWCNT, SiO <sub>2</sub> , Ag, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , MgO	-

ตัวแปรป้อน	ช่วงข้อมูล	หน่วย
สัดส่วนของอนุภาคนาโน 2	0.20, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 0.90, 1.00,	Fraction
	0.66, 0.80, 0.90, 1.00	-
การนำความร้อนของอนุภาคนาโนที่ 2	1.4- 3000	W/(m.K)
<b>ตัวแปรส่งออก</b>		
การนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน	0.25-1.07	W/(m.K)

ตารางที่ 1.2 ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออก ของความจุความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน

ตัวแปรป้อน	ช่วงข้อมูล	หน่วย
อัตราส่วนของน้ำ	0.00, 0.60, 0.70, 1.00	Fraction
ความจุความร้อนของน้ำ	4.18	KJ/ (kg K)
อัตราส่วนน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	0.00, 0.30, 0.40, 1.00	Fraction
ความจุความร้อนของน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	3.14	KJ/ (kg K)
อุณหภูมิ	288.15-353.15	K
ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน	0.00-10.00	% Vol
สัดส่วนอนุภาคนาโนที่ 1	0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60,0.70, 0.80, 0.90, 1.00	
อนุภาคนาโนที่ 1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , GO, MgO, MWCNT, SWCNT, SiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , TiN, TiO <sub>2</sub> , GNP	-
ความจุความร้อนอนุภาคนาโนที่ 1	6.95- 877.00	KJ/ (kg K)
อนุภาคนาโนที่ 2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, MWCNT, TiO <sub>2</sub>	
สัดส่วนของอนุภาคนาโน 2	0.10, 0.20, 30, 0.40, 0.50, 0.60,0.70, 0.80, 0.90, 1.00	fraction
ความจุความร้อนอนุภาคนาโนที่ 2	531.00- 877.00	KJ/ (kg K)
<b>ตัวแปรส่งออก</b>		
ความจุความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน	0.25-1.07	KJ/ (kg K)

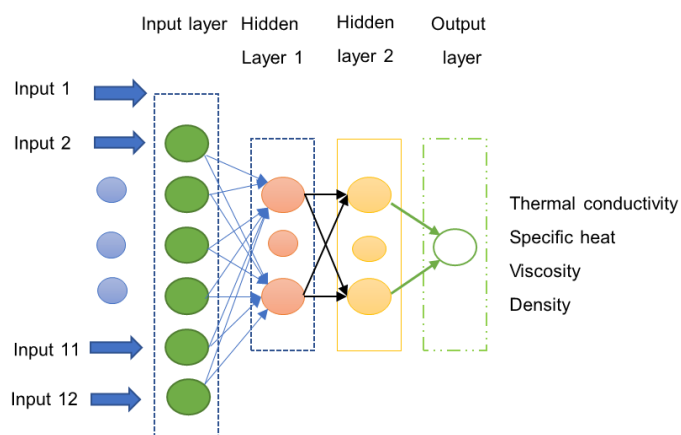
ตารางที่ 1.3 ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออก ของความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน

ตัวแปรป้อน	ช่วงข้อมูล	หน่วย
อัตราส่วนของน้ำ	0.00, 0.60, 0.70, 1.00	Fraction
ความหนืดของน้ำ	0.89	mPa.s
อัตราส่วนน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	0.00, 0.30, 0.40, 1.00	Fraction
ความหนืดของน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	16.1	mPa.s
อุณหภูมิ	273.15-353.15	K
ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน	0.00-10.00	% Vol
อนุภาคนาโนที่ 1	Ag, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , GO, MgO, MWCNT, SWCNT, SiO <sub>2</sub> , TiN, TiO <sub>2</sub> , ZnO, GNP	-
สัดส่วนอนุภาคนาโนที่ 1	0.20, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 0.90, 1.00	
ความหนาแน่นอนุภาคนาโนที่ 1	1.31- 10.05	g/cm <sup>3</sup>
อนุภาคนาโนที่ 2	Ag, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, MWCNT, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub>	
สัดส่วนของอนุภาคนาโน 2	0.15, 0.2, 0.25, 0.26, 0.33, 0.40, 0.50, 0.66, 0.80, 0.90, 1.00	fraction
ความหนาแน่นอนุภาคนาโนที่ 2	2.10- 10.50	g/cm <sup>3</sup>
ตัวแปรส่งออก		
ความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน	0.25-1.07	mPa.s

ตารางที่ 1.4 ช่วงข้อมูลตัวแปรป้อน ตัวแปรส่งออกของ ความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน

ตัวแปรป้อน	ช่วงข้อมูล	หน่วย
อัตราส่วนของน้ำ	0.00, 0.60, 0.70, 1.00	-
ความหนาแน่นของน้ำ	1.00	g/cm <sup>3</sup>
อัตราส่วนน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	0.00, 0.30, 0.40, 1.00	-
ความหนาแน่นของน้ำมันเอธิลีนไกลคอล	1.11	g/cm <sup>3</sup>
อุณหภูมิ	273.15-353.15	K
ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน	0.00-10.00	% Vol
อนุภาคนาโนที่ 1	Ag, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , GO, MgO, MWCNT, SWCNT, SiO <sub>2</sub> , TiN, TiO <sub>2</sub> , ZnO, GNP	
สัดส่วนอนุภาคนาโนที่ 1	0.20, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 0.90, 1.00	-
ความหนาแน่นอนุภาคนาโนที่ 1	1.31- 10.05	g/cm <sup>3</sup>
อนุภาคนาโนที่ 2	Ag, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, MWCNT, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub>	
สัดส่วนของอนุภาคนาโน 2	0.20, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 0.90, 1.00	fraction
ความหนาแน่นอนุภาคนาโนที่ 2	2.10- 8.96	g/cm <sup>3</sup>
<b>ตัวแปรส่งออก</b>		
ความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน	0.25-1.07	g/cm <sup>3</sup>

- 3) ออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม ออกแบบจำนวนข้อมูลป้อนเข้าและผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยข้อมูลป้อนประกอบไปด้วยตัวแปรป้อนเข้า 12 ตัวแปร และ ตัวแปรส่งออก 1 ตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และ ทำการออกแบบรูปแบบการสอนโครงข่ายประสาทเทียม ตามตารางที่ 1.2



รูปที่ 1.1 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 1.5 ข้อกำหนดของโครงข่ายประสาทเทียม

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด
1	ประเภทโครงข่าย	ส่งข้อมูลเชื่อมต่อกันไปข้างหน้าและแพร่ย้อนกลับ (Cascade forward backpropagation) ส่งข้อมูลเชื่อมต่อกันไปข้างหน้าและแพร่ย้อนกลับ (Cascade forward backpropagation)
2	รูปแบบการฝึก	Levenberg-Marquardt (LM) backpropagation
3	รูปแบบการปรับตัวการเรียนรู้	gradient descent with momentum weight and bias (LEARNGDM)
4	การวัดประสิทธิภาพ	Mean square error (MSE), R
5	รูปแบบการส่งข้อมูล	Hyperbolic tangent sigmoid (TANSIG) Logarithmic sigmoid (LOGSIG) และ Linear (PURELIN)
6	การแบ่งข้อมูล	แบบสุ่ม
7	จำนวนข้อมูลป้อนเข้า	12
8	จำนวนข้อมูลส่งออก	1
9	จำนวนชั้นประมวลผลที่ซ่อนอยู่	1 และ 2

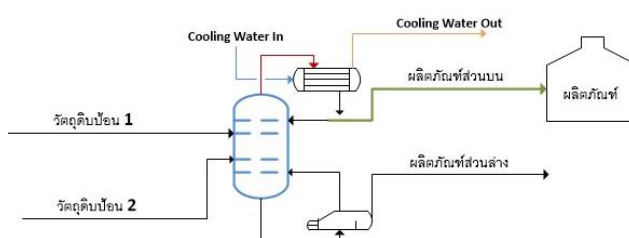
- 4) ตรวจสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ย (MSE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R)
- 5) นำค่าสมบัติความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลผสมนาโนที่ได้ ไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรมจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบนหอกลิ้นของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ของไหลพื้นฐานและการใช้ของไหลไฮบริดนาโน โดยค่าตัวแปรแสดงในตารางที่ 1.3 และ รูปแบบกระบวนการกลั่นไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์แสดงในรูปที่ 1.2 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ถูกใช้เป็นตัวทำละลายในหลายอุตสาหกรรมซึ่งทั่วไปมี 2 เกรด คือ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 99.8 wt.% และ 87.4 wt.% โดยกระบวนการผลิตที่นิยมใช้ คือ Direct hydration of propylene จะได้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 46.7 wt.% และนำไปเพิ่มความบริสุทธิ์กระบวนการกลั่น โดยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์จะออกจากส่วนบนของหอกลิ้น ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีของไหลพื้นฐานสำหรับใช้ในการหล่อเย็นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และได้ผลิตภัณฑ์ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์นำไปเก็บที่ถังผลิตภัณฑ์ และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์บางส่วนจะถูกป้อนกลับเข้าหอกลิ้นเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ งานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำความร้อน



ระหว่างการใช้ของไหลพื้นฐานกับการใช้ของไหลไฮบริดนาโน เมื่อกำหนดความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์และความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการ

ตารางที่ 1.6 ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ณ หอกลับ

ตัวแปร	วัดจุดดับ ป้อน 1	วัดจุดดับ ป้อน 2	ผลิตภัณฑ์ ส่วนบน	ผลิตภัณฑ์ ส่วนล่าง	หน่วย
อุณหภูมิ	98.8	190.0	81.7	144.5	°C
ความดัน	2.0	1.0	1.0	1.2	bar
อัตราการไหลเชิงโมล	778.10	673.00	372.74	1078.40	kmol/hr
อัตราส่วนเชิงโมลไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	0.4790	0.0000	0.9990	0.0000	mole fraction
อัตราส่วนเชิงโมลน้ำ	0.5205	0.0010	0.0008	0.3759	mole fraction
อัตราส่วนเชิงโมลไดไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	0.0005	0.0000	0.0001	0.0000	mole fraction
อัตราส่วนเชิงโมลไดเมทิลซิลฟอกไซด์	0.0000	0.9990	0.0001	0.6241	mole fraction



รูปที่ 1.2 รูปแบบกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

6) รวบรวม วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง เขียนและนำเสนอวิทยานิพนธ์

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน
- 2) สามารถนำสมบัติทางความร้อนไปประยุกต์ในการถ่ายโอนความร้อนได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ของไหลไฮบริดนาโน

นักวิจัยคนแรกที่ศึกษาการเติมอนุภาคนาโนลงในของไหลพื้นฐานได้แก่ Choi และคณะ [5] โดยเป็นของผสมระหว่างของไหลพื้นฐาน เช่น น้ำ และน้ำมันเอทิลีนไกลคอล ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำ ผสมกับอนุภาคนาโนที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่า เช่น อลูมิเนียม (Al) เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และนิกเกิล (Ni) โดยผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันที่มีความเสถียรเรียกของผสมนี้ว่า ของไหลนาโน Turcu และคณะ [6] ได้มีการพัฒนาเติมอนุภาคนาโนมากกว่าหนึ่งชนิด ลงในของไหลพื้นฐานเดี่ยวหรือผสม จึงเรียกว่าของไหลไฮบริดนาโน

#### 2.2 คุณสมบัติของของไหลไฮบริด

การศึกษาสมบัติของของไหลผสมจำแนกออกเป็นสมบัติทางความร้อน คือ การนำความร้อน (Thermal conductivity) ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) และสมบัติการไหล คือ ความหนาแน่น (Density) และความหนืด (Viscosity)

การนำความร้อนของของไหลผสม (Thermal conductivity) คือ ค่าที่บอกความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ ใช้สัญลักษณ์คือ  $k$  มีหน่วย คือ  $W/m K$  ซึ่งของไหลที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่า สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่า

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) คือค่าความสามารถในการดูดซับความร้อน ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักและหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ ใช้สัญลักษณ์  $C_p$  มีหน่วยคือ  $kJ/(kg K)$

ความหนาแน่น (Density) คือสัดส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ใช้สัญลักษณ์คือ  $\rho$  หน่วยตามมาตรฐาน SI คือ  $kg/cm^3$  ซึ่งค่าความหนาแน่นของของไหลไฮบริดส่งผลต่อความดันลด ค่าความเสียดทาน เลขเรย์โนลด์ (Re-number) ของของไหลภายในท่อ

ความหนืด (Viscosity) ความสามารถในการต้านทางการไหลแต่ละชั้นของของเหลว ใช้สัญลักษณ์คือ  $\eta$  ในระบบ SI มีหน่วยเป็น  $mPa.s$  ในทางทฤษฎีของไหลที่มีค่าความหนืดสูงย่อมต้องใช้พลังงานของปั๊มที่สูงตามด้วย

การศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน ต้องใช้ทรัพยากรบุคคลและเครื่องมืออุปกรณ์มากมาย ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยจำนวนมากนำโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน

## 2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks)

### 2.2.1 นิยาม

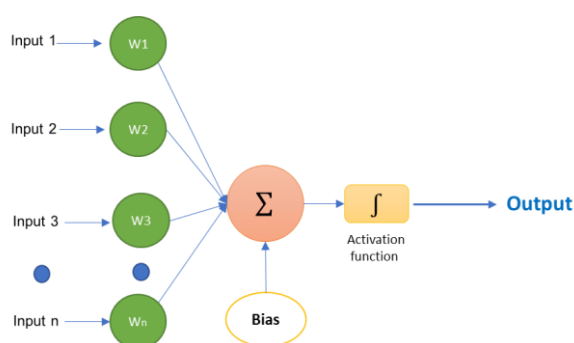
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) เป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หลักการทำงานคล้ายกับสมองของมนุษย์ โดยสามารถเรียนรู้ข้อมูลที่ป้อนและจดจำลักษณะความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างข้อมูล เพื่อสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ สามารถทำนายข้อมูลได้ โดยจะมีชั้นรับข้อมูล ชั้นประมวลผล และชั้นส่งผล ในช่วงแรกการเกิดขึ้นของโครงข่ายประสาทเทียมอาจยังไม่เป็นที่รู้จักมากนัก ต่อมามีการพัฒนาและประยุกต์ใช้โดยผู้เชี่ยวชาญในหลาย ๆ งาน เช่น งานทางด้านตลาดหุ้น [7] การจัดการพลังงาน [8] และทางการแพทย์ [9] เป็นต้น

### 2.2.2 ส่วนประกอบ

โดยทั่วไปโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วย 3 ชั้น คือ ชั้นรับข้อมูล (Input layer) ชั้นและชั้นซ่อน (Hidden layer) ชั้นส่งออก (Output layer) โดยชั้นรับข้อมูล (Input layer) ทำหน้าที่รับข้อมูลที่เรป้อนตามจำนวนที่เรากำหนด เพื่อส่งต่อไปยังชั้นถัดไป คือชั้นซ่อน (Hidden layer) จะมีการถ่วงน้ำหนัก ( $W_i$ ) ของค่าที่ป้อนเข้า บวกด้วยค่าไบอัส ( $b$ ) ก่อน โดยเริ่มต้นจะสุ่มมาก่อน หลังจากนั้นจะค่อยๆ ปรับค่าน้ำหนัก ( $W_i$ ) และค่าไบอัส ( $b$ ) เพื่อให้ได้ค่าส่งออกที่ตรงกับค่าจริงมากขึ้น และส่งข้อมูลออกไปยังชั้นส่งออก (Output layer) โดยการส่งข้อมูลแต่ละชั้นจะมีการใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

### 2.2.3 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

หน้าที่ของฟังก์ชันกระตุ้นเปรียบเสมือนกระบวนการทำงานในตัวเซลล์ประสาท เพื่อส่งเป็นสัญญาณขาออก ส่งออกไปให้แก่นิวรอนตัวอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.1 โดยก่อนส่งต่อไปยังนิวรอนอื่น ๆ จะต้องมีการปรับให้ได้ค่าที่เหมาะสมก่อน ผ่านการใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) โดยฟังก์ชันกระตุ้น (Active function) [10] นิยมนำมาใช้งานคือ



รูปที่ 2.1 ลักษณะของฟังก์ชันกระตุ้น

$$A = \sum_{i=1}^m W_i X_i + b \quad (2.1)$$

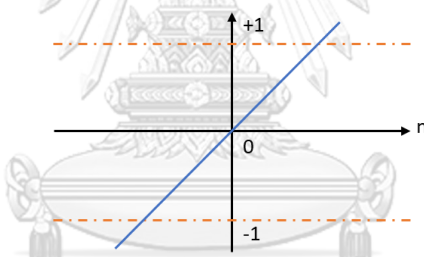
เมื่อ

$A$	คือ ข้อมูลส่งออก
$X_i$	คือ ข้อมูลที่ป้อน
$i^{th}$	คือ จำนวนข้อมูลที่ป้อน
$W_i$	คือ น้ำหนักของนิวรอนที่ $i^{th}$
$b$	คือ ค่าไบอัส
$m$	คือ จำนวนข้อมูลที่ป้อน

1) ฟังก์ชันเส้นตรง (Linear) ใช้ประมาณค่าแบบเชิงเส้นสำหรับส่งข้อมูลไปยังนิวรอนอื่น ๆ เซลล์ประสาทที่ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงจะใช้ในการประมาณค่าเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.2 และมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.2)

$$purelin(n) = n \quad (2.2)$$

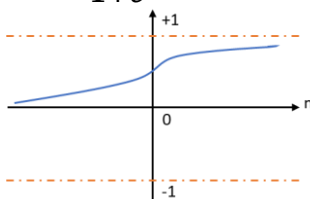
เมื่อ  $n$  คือผลลัพธ์ที่ได้จากผลรวมของผลคูณระหว่างข้อมูลที่นำเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนักที่ชั้นนั้นได้รับ



รูปที่ 2.2 ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเส้นตรง

2) ฟังก์ชันลอจิสติกมอยด์ (Log-Sigmoid) ใช้แปลงข้อมูลส่งออกระหว่างนิวรอน โดยเปลี่ยนรูปของข้อมูลขาเข้าที่มีค่าตั้งแต่บวกอนันต์ถึงลบอนันต์ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ดังรูปที่ 2.3 และมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.3) ฟังก์ชันนี้จะใช้เมื่อต้องการทำนายความน่าจะเป็น (Probability) ของข้อมูลออก

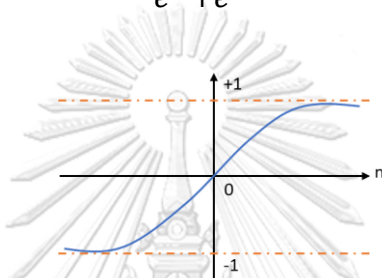
$$logsig(n) = \frac{1}{1+e^{-n}} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบซิกมอยด์

3) ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ (Tan-Sigmoid) เป็นฟังก์ชันที่มีลักษณะคล้าย ลอกซิกมอยด์ ข้อดี คือ ช่วยลดการหายไปของค่าระหว่างการทำเกรเดียนท์ (Gradient decent) ใช้ประมาณค่าฟังก์ชันสำหรับชั้นแอบแฝงให้มีค่าอยู่ระหว่าง -1 กับ 1 ดังรูปที่ 2.4 และมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.4) ข้อดีคือ สามารถแปลงค่าข้อมูลเข้าที่มีค่าเป็นลบมาก ๆ ให้เป็นข้อมูลออกที่ติดลบได้ และข้อมูลที่ค่าเป็นศูนย์จะถูกแปลงเป็นข้อมูลออกที่มีค่าใกล้ ศูนย์ (near-zero output)

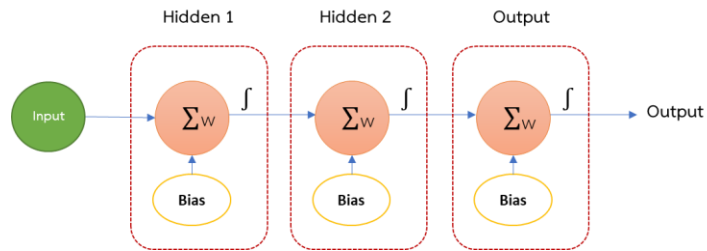
$$\text{tansig}(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์

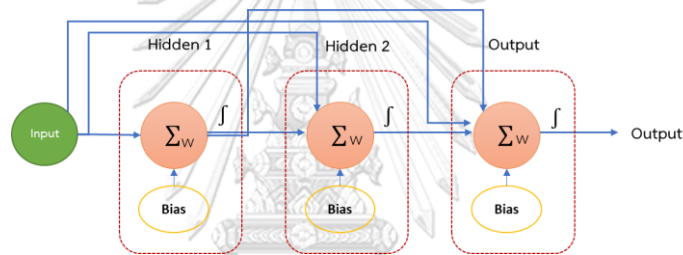
#### 2.5.4 ประเภทโครงข่ายประสาทเทียม

1. โครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งไปข้างหน้าแพร่ย้อนกลับ (Feedforward Back-propagation network) สามารถแก้ปัญหาในลักษณะเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นได้ โดยมีกระบวนการ เรียนรู้ข้อมูลที่ป้อน และเริ่มคำนวณหาผลรวมที่ได้ในแต่ละนิเวรอน แล้วส่งผลลัพธ์ ไปยังชั้นต่อไปโดยผ่านฟังก์ชันกระตุ้น โดยนำผลข้อมูลส่งออก ดังรูปที่ 2.5 ในแต่ละครั้งของชุดข้อมูลที่ป้อนให้กับโครงข่ายนั้น เพื่อหาค่า ความผิดพลาดในแต่ละครั้ง แล้วนำค่าความผิดพลาดที่ได้นั้นย้อนกลับไปยังชั้นขาออก และต่อไปยังนิเวรอนต่าง ๆ ของชั้นภายในโครงข่าย และนำค่าผิดพลาดที่ได้ มาใช้ในการคำนวณปรับค่าถ่วงน้ำหนัก โดยที่การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะมีการ คำนวณในทิศทางย้อนกลับจากทางด้านข้อมูลขาออก จนปรับค่าถ่วงน้ำหนักมาถึงชั้นแรก จากนั้นคำนวณหาค่าข้อมูลขาออกใหม่ กระบวนการเรียนรู้จะมีการคำนวณซ้ำจนกระทั่งค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายที่ต้องการ [10]



รูปที่ 2.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้า

2. โครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งไปข้างหน้าและด้านข้างแพร่ย้อนกลับ (Cascade forward Back-propagation network) หลักการทำงานก็จะคล้ายๆ กับโครงข่ายประสาทแบบส่งไปข้างหน้าแพร่ย้อนกลับ แตกต่างที่จะมีการส่งค่าจากชั้นป้อนไปชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นส่งออกควบคู่กันด้วย



รูปที่ 2.6 โครงข่ายประสาทข้างหน้าและด้านข้างแพร่ย้อนกลับ

เมื่อได้โครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถทำนายค่าการไหลและสมบัติความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนที่แล้ว จึงนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของของไหลไฮบริดนาโนที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านบนทอกล้นของกระบวนการกลั่นไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ก่อนการนำสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมจำลองกระบวนการจะต้องทราบหลักการทำงานและการใช้งานโปรแกรม จึงสร้างแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเทียบจากกรณีศึกษากระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] แล้วจึงแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องไปออกจะแบบการทดลองเพื่อศึกษาความอ่อนไหวของการนำค่าการนำสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ค่าความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และ ปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

## 2.4 การจำลองกระบวนการในการถ่ายโอนความร้อน

กระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ จำเป็นต้องปรับค่าควบคุมที่เกี่ยวข้องหลายตัวแปรเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ดี การจำลองกระบวนการผลิตโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทอย่างมากในกระบวนการทางวิศวกรรม ในการจำลองสถานะที่แตกต่างกันในกระบวนการอุตสาหกรรม โปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง กระบวนเหล่านี้ได้แก่ ASPEN Plus เพื่อจำลองกระบวนการผลิตที่ ภาวะที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถช่วยคำนวณผลลัพธ์ของกระบวนการผลิตได้ สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับของแต่ละภาวะได้ ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองหลายภาวะได้ โปรแกรม Aspen Plus จัดเป็นหนึ่งในโปรแกรมที่นิยมใช้กันมากทั่วโลก โดยบริษัท AspenTech, Inc

### 2.4.1 หลักการคำนวณ

การคำนวณของโปรแกรม Aspen Plus เป็นการใช้หลักของการดุลมวล (Material balance) พื้นฐานเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic fundamentals) ในภาวะคงตัว (Steady state)

2.4.1.1. พื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic fundamentals) สมการที่ (2.5) แสดงสมดุลทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ระบบ [11]

$$Input + Generation - Output - Consumption = Accumulation \quad (2.5)$$

1) กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (The first law of thermodynamics) กฎข้อที่หนึ่งกล่าวถึงการอนุรักษ์พลังงาน หลักการคือ พลังงานจะไม่มีสูญหายหรือ ถูกทำลายได้ แต่เพียงเกิดการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของพลังงานอื่น เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบ (System) และ สิ่งแวดล้อม (Surrounding) พบว่าพลังงานรวมของระบบกับ สิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (2.6)$$

เมื่อ  $Q$  คือ พลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบได้

$W$  คือ พลังงานที่สามารถถ่ายเทผ่านขอบเขตของระบบได้

$U$  คือ พลังงานภายในระบบ

$E_k$  คือ พลังงานจลน์ของระบบ

$E_p$  คือ พลังงานศักย์ของระบบ

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์พลังงานที่ได้จากการรวมพจน์ของพลังงานภายใน และ พลังงานที่ได้จากผลคูณของความดัน (Pressure; P) และปริมาตร (Volume; V) คือ ค่าเอนทัลปี (Enthalpy; H) ดังสมการ (2.7)

$$H = U + PV \quad (2.7)$$

ที่ระบบเปิดแบบควบคุมปริมาตรจึงสามารถเขียนสมการดุลมวล และ พลังงานได้ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (2.8)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_o H_o - \sum \dot{m}_i H_i \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\dot{m}_i$  คือ อัตราการไหลโดยมวลขาเข้า

$\dot{m}_o$  คือ อัตราการไหลโดยมวลขาออก

$\dot{Q}$  คือ อัตราความร้อน

$\dot{W}$  คือ อัตราการทำงาน

2) กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (The second law of thermodynamics) จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวไว้ว่า กระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง เอนโทรปีของระบบและสิ่งแวดล้อมรวมกันจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าทุกกระบวนการที่เป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์อาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง เช่น การวางแก้วน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไว้ภายในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจากน้ำร้อนเกิดการถ่ายเทให้แก่ห้องทำให้ปริมาณความร้อนของน้ำที่ลดลง จะเท่ากับปริมาณของความร้อนภายในห้องที่เพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่ากระบวนการนี้ ไม่ละเมิดกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ จากตัวอย่างจะพบว่ากระบวนการนี้ มีทิศทางเกิดที่แน่นอนและไม่เกิดในทิศย้อนกลับ หรือเรียกว่ากระบวนการผันกลับไม่ได้ (Irreversible processes) แต่กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ไม่สามารถอธิบายทิศทางของกระบวนการนี้ได้ ดังนั้นจึงต้องมีกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อใช้พิจารณา กระบวนการนั้น ๆ ว่าสามารถเกิดขึ้นได้จริงหรือไม่

3. การคำนวณประสิทธิภาพการนำความร้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถดึงออกได้ (Heat power absorbed) หาได้จากสมการ (2.10)

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} \quad (2.10)$$



- เมื่อ  $\dot{Q}$  คือ อัตราความร้อน  
 $U$  คือ พลังงานภายในระบบ  
 $A$  คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน  
 $\Delta T_{lm}$  คือ ผลต่างอุณหภูมิแบบล็อก

โดยผลต่างอุณหภูมิแบบล็อก The Log mean temperature difference method (LMTD) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.11)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (2.11)$$

- เมื่อ  $\Delta T_1$  คือ ผลต่างอุณหภูมิสายร้อนเข้าและอุณหภูมิสายเย็นออก  
 $\Delta T_2$  คือ ผลต่างอุณหภูมิสายร้อนออกและอุณหภูมิสายเย็นเข้า

## 2.4.2 ขั้นตอนการใช้งาน

2.4.2.1. ระบุองค์ประกอบ (Chemical components) ทำการเพิ่มสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการจำลอง โดยเลือกจาก Aspen Plus databanks

2.4.2.2. ระบุวิธีการในการคำนวณหาคคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ขององค์ประกอบที่ผสมอยู่ในกระบวนการ

2.4.2.3. สร้าง Process flowsheet โดยมีวิธีการ ดังนี้

- กำหนดอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมด
- เลือกแบบจำลองของอุปกรณ์จาก Aspen Plus Model Library แล้ววางบน Process flowsheet
- กำหนดกระแสการไหล (Streams) และ ตั้งชื่อกระแสการไหล
- เชื่อมกระแสการไหลเข้าไปยังอุปกรณ์ในกระบวนการที่อยู่บน Process flowsheet

2.4.2.4. ตั้งค่าองค์ประกอบ อัตราการไหล อุณหภูมิ และความดัน ของกระแสการไหลที่ป้อนเข้า กระบวนการ (Feed)

2.4.2.5. กำหนดค่าตัวแปร สำหรับอุปกรณ์ในกระบวนการเสร็จแล้ว จึงทำการคำนวณโดยโปรแกรม (RUN) เพื่อให้ระบบคำนวณผลลัพธ์ของกระบวนการจำลองออกมา และตรวจสอบความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยได้ค่าตัวแปรที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและกำหนดเป็นค่ามาตรฐาน

## 2.5 การเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen plus

เมื่อได้ค่าตัวแปรมาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์แล้ว จึงทำการเพิ่มคุณสมบัติของสารบริสุทธิ์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (Pure component temperature-dependent properties) เนื่องจากในฐานข้อมูลของโปรแกรม Aspen Plus ไม่มีของไหลไฮบริดนาโน ดังนั้นจึงต้องเพิ่มค่าการนำความร้อนของไหลไฮบริดนาโนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมของของไหลไฮบริดนาโนทั้ง 3 ชนิดในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ โดยของไหลไฮบริดนาโนมีสถานะเป็นของเหลว จึงเลือกใช้สมการที่คิดค้นโดย DIPPR (Design Institute for Physical Property Research) [12] สำหรับใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ที่มีผลต่อคุณสมบัติของสารประกอบ เช่น การหาความร้อนจำเพาะของของเหลว หรือของแข็ง และค่าการนำความร้อนสำหรับของเหลว สามารถหาได้จากสมการ (2.12)

$$Y = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (2.12)$$

เมื่อ  $Y$  คือ คุณสมบัติของสารประกอบ

$A-E$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ

$T$  คือ อุณหภูมิ

การหาค่าสัมประสิทธิ์ที่  $A-E$  สำหรับสมการสามารถหาได้โดย Microsoft Excel โดยใช้ฟังก์ชัน คือ =LINEST(known\_ys, known\_xs^(1,2,3,4))

ในงานวิจัยนี้ทราบค่า  $Y$  และค่า  $T$  คือค่าการนำความร้อนและอุณหภูมิของสารประกอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม จึงคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่  $A-E$  หลังจากนั้นทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ที่  $A-E$  ที่ได้จากสมการเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์ จึงนำไปแทนที่ในโปรแกรม Aspen Plus

## 2.6 การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปรในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

เมื่อทราบค่ามาตรฐานของตัวแปรของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] จึงทำการเพิ่มของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen Plus เสร็จแล้ว ต่อไปจึงทำการกำหนดตัวแปรเพื่อทดลองหาความอ่อนไหวของตัวแปร เพื่อต้องการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และค่าความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนองแสดงใน ตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปรมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกที่ Model Analysis เลือก Sensitivity กดเลือก New เลือก OK
2. กำหนดตัวแปรต้น (Vary) ดังตารางที่ 2.1
3. กำหนดตัวแปรตาม (Define) ดังตารางที่ 2.2
4. กดเลือกที่ Cases และใส่ค่าตัวแปรต้นให้ครบตามค่าที่ได้จาก โปรแกรมออกแบบการทดลอง โดยค่า 1 คือค่าสูงสุด และ ค่า -1 คือ ค่าต่ำสุด หลังจากนั้นสั่งให้โปรแกรมคำนวณ (Run)
5. ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง เมื่อไม่มีข้อผิดพลาด จึงผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรต่อไป

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรต้นสำหรับทดสอบความอ่อนไหว

No	parameter	Unit
1	Reflux ratio of the column	kmol/sec
2	Bottom rate	kmol/sec
3	Temperature Feed2	°C
4	Pressure Feed2	bar
5	Mole flowrate Feed2	kmol/sec
6	Temperature In	°C
7	Pressure In	bar
8	Mass Flow In	kg/sec
9	Area Heat exchanger	sqm

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรตอบสนองสำหรับทดสอบความอ่อนไหว

No	parameter	Unit
1	Outlet product (IPA)	%
2	Heat at heat exchanger	KW

## 2.7 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์เป็นวิธีการทางสถิติที่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองหลาย ๆ ตัวแปร และนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง โดยโปรแกรมสามารถช่วยสร้างแบบจำลองการทำนาย (Predict model) เลือกจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization) แบบจำลองที่ถูกเลือกจะมีการทดสอบความเหมาะสมทางสถิติและวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) โดยพิจารณาจากค่า Sequential p-value ( $<0.05$ ) การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการทำนาย (Lack of fit p-value) และ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ Coefficient of determination  $R^2$  ( $>0.80$ ) ทั้งยังสามารถสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Respond surface plot) ซึ่งสามารถมองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นที่มีผลกับตัวแปรตอบสนองอย่างชัดเจน หลังจากนั้นนำค่าตัวแปรที่ได้ไปทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำผลไปใช้งานจริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตที่มีความหลากหลายตัวแปร โปรแกรมที่สามารถทำได้ คือ Design expert และ Minitab เป็นต้น[14] การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

### 2.7.1. แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single factor design)

เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่าง ๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือไม่ สามารถแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ ๆ คือ

1) การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) จัดเป็นแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลที่ง่าย เป็นแผนการทดลองที่มีปัจจัยเดียวแต่จะทำการเปรียบเทียบระดับของปัจจัย ไม่มีสาเหตุจากปัจจัยอื่น ๆ มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้แต่ส่งผลกระทบต่อผลและไม่มีการควบคุม

2) การทดลองบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Block Design: CRB) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว บางการทดลองอาจได้ผลการทดลองไม่สม่ำเสมอ หรือไม่สามารควบคุมปัจจัยรบกวนได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง จึงใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนออกได้ เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองมาจากปัจจัยที่ศึกษาเท่านั้น

### 2.7.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design)

การทดลองเชิงแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่มีปัจจัยที่มีหลายปัจจัย โดยในการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งอิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองจากปัจจัยด้วยตัวมันเอง และอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าระดับปัจจัยหนึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยหนึ่ง ความแปรปรวน

ในการทดลองประกอบด้วย ความแปรปรวนจากอิทธิพลหลัก ความแปรปรวนเนื่องจากอิทธิพลร่วม และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง โดยมีรูปแบบย่อย ดังนี้

1) การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟคทอเรียลปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนทั้งหมด  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจำกัดระดับ 2 ระดับ ตัวอย่างเช่น ในการทดลองมี 9 ปัจจัย จะได้การทดลองทั้งหมด 512 การทดลอง

2) การออกแบบการทดลองแบบ  $3^k$  แฟคทอเรียลปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนทั้งหมด  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจำกัดระดับ 3 ระดับ ตัวอย่างเช่น ในการทดลองมี 9 ปัจจัย จะได้การทดลองทั้งหมด 19683 การทดลอง

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนด้วยการทดลองจริง จะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและต้องมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ดังนั้น จึงมีนักวิจัยจำนวนมากนำโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการทำนายสมบัติทางความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน โดย Aduna และคณะ [15] ใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน โดยทำการเก็บข้อมูลจากการทดลอง แล้วนำข้อมูลมาสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ตัวแปรป้อน 7 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ความเข้มข้นโดยปริมาตร ระหว่าง 0-35 อุณหภูมิระหว่าง 20-70 องศาเซลเซียส ค่าอะเซนตริกของของไหลพื้นฐานระหว่าง 0.6343 – 0.6959 ความหนาแน่นของอนุภาคนาโนระหว่าง 1.0 -1.05  $g/cm^3$  สัดส่วนการผสมกันของอนุภาคนาโนระหว่าง 0.15-0.85 % Vol ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนระหว่าง 1.36-3,007.4  $W/(m.K)$  และขนาดของอนุภาคนาโนที่ใช้ระหว่าง 1.5 -70 นาโนเมตร โดยได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีค่า Coefficient of determination ( $R^2$ ) 0.9997 ของค่าการนำความร้อน  $W/(m.K)$  ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลผสมนาโน

Ahmadloo และคณะ [16] ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนต่างชนิดกันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ตัวแปรป้อน 5 ตัวแปร อนุภาคนาโนที่สนใจ ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) เซอร์โคเนียไดออกไซด์ ( $ZrO_2$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) คอปเปอร์ ( $Cu$ ) อะลูมิเนียม ( $Al$ ) โดยเก็บข้อมูลจาก 20 งานวิจัย และได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีค่า Coefficient of determination ( $R^2$ ) จากการสอนโครงข่ายประสาทเทียม เท่ากับ 0.995 และ จากการทดสอบชุดข้อมูล เท่ากับ 0.993 ของค่าการนำความร้อน  $W/(m.K)$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนได้

Tian และคณะ [17] ใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแกรไฟีนออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำและเอทิลีนไกลคอล โดยใช้ความเข้มข้นอนุภาคนาโน ระหว่าง 0.1-1.6 โดยปริมาตร อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง ระหว่าง 25-55 องศาเซลเซียส โดยใช้รูปแบบของโครงข่ายประสาทแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้า (Perceptron feed-forward ANN) ผลลัพธ์ที่ได้จากการสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะได้ค่า Coefficient of determination ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.995 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ  $1.67 \times 10^{-6}$  ของค่าการนำความร้อน  $W/(m.K)$  ทั้งนี้ จากการทดลอง พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโน

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น นักวิจัยได้พัฒนาค่าการนำความร้อนของของไหลผสมนาโนให้ดีขึ้น แต่ก็ยังไม่ได้ศึกษาการนำของไหลไฮบริดนาโนไปใช้ในกระบวนการผลิต จึงได้มีนักวิจัยศึกษาผลกระทบของการใช้ของไหลไฮบริดนาโนในกระบวนการผลิต โดย Tora และคณะ [7] ใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีจำลองผลกระทบของกระบวนการผลิตที่ใช้ของไหลไฮบริดนาโนตัวแปรที่ใช้ คือ ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน ซึ่งแสดงให้เห็นการประยุกต์ใช้งานร่วมกับโปรแกรมจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี งานวิจัยนี้ต้องการนำค่าการไหลและสมบัติความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรมจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของของไหลไฮบริดนาโนที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านบนหอกลับของกระบวนการกลั่นไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ที่มีค่าการไหลและสมบัติการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าของไหลพื้นฐาน ที่จะส่งผลต่อการใช้พลังงานของเครื่องสูบของไหลเพื่อส่งเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าตัวแปรที่มีผลกับสมบัติการไหลและสมบัติทางความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน ได้แก่ ชนิดของของไหลพื้นฐาน ค่าการนำความร้อนของของไหลพื้นฐาน อุณหภูมิ ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน เมื่อทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของของไหลผสมอนุภาคนาโนแล้ว จึงนำไปสู่การเก็บข้อมูลงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่าการนำความร้อนของของไหลผสมอนุภาคนาโน ที่ค่าควบคุมต่าง ๆ กัน

#### 3.1 ศึกษาคุณสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน

##### 3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าตัวแปรหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติของของไหลนาโน ได้แก่

1. ชนิดของไหลพื้นฐาน
2. อัตราส่วนของของไหลพื้นฐาน
3. คุณสมบัติของของไหลพื้นฐาน คือค่าการนำความร้อนของของไหลพื้นฐาน และความเข้มข้นของอนุภาคนาโน
4. อัตราส่วนของอนุภาคนาโน
5. ชนิดของอนุภาคนาโน
6. คุณสมบัติของอนุภาคนาโนค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน ค่าความจุความร้อนของอนุภาคนาโน ค่าความหนาแน่นของอนุภาคนาโน
7. อุณหภูมิที่ทำการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติทางความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน พบว่ามีขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน และยังไม่ได้นำค่าการสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลไปประยุกต์ใช้ ในระบบอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการ ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน และนำค่าที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายโอนความร้อนในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เป็นกรณีศึกษา

### 3.2 การเก็บข้อมูลคุณสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน

#### 3.2.1 การเก็บข้อมูลค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน

ข้อมูลมาจากงานวิจัย 26 งานวิจัย จำนวน 863 ข้อมูลนำไปเปลี่ยนแปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยเดียวกันดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลค่าการนำความร้อน

No	Base fluid	Temperature (K)	$\phi$ (Vol%)	Nanoparticle 1	Nanoparticle 1 (Fraction)	Nanoparticle 2	Nanoparticle 2 (Fraction)	Thermal conductivity (W/m.K)
1	Water-EG (50:50)	298.15- 323.15	0.00- 1.60	GO	0.50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.3693- 0.5350 [17]
2	Water-EG (80:20)	298.15- 323.15	0.00- 0.40	MWCNT, TiO <sub>2</sub> , ZnO	1.00, 0.53, 0.37	-	-	0.4960- 0.6150 [18]
3	Water-EG (60:40)	303.15- 353.15	1.00	TiO <sub>2</sub>	0.20, 0.40, 0.60, 0.80	SiO <sub>2</sub>	0.20, 0.40, 0.60, 0.80	0.4120- 0.5100 [19]
4	Water	293.15- 333.15	0.00- 0.30	MWCNT	0.26	-	0.74	0.6000- 0.8400 [20]
5	Water-EG (60:40)	303.15- 353.15	0.00- 0.10	TiO <sub>2</sub>	0.80	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	0.4150- 0.6200 [21]
6	Water-EG (60:40)	293.15- 333.15	0.25- 1.00	TiN	1.00	-	-	0.3300- 0.5250 [22]
7	Water	293.15- 333.15	0.00- 0.50	SWCNT	1.00	-	-	0.6000- 1.0700 [23]
8	Water	293.15- 333.15	0.00- 0.25	SWCNT	1.00	-	-	0.6000- 0.8800 [24]
9	Water-EG (60:40)	303.15- 353.15	0.00- 3.00	TiO <sub>2</sub>	0.50	SiO <sub>2</sub>	0.50	0.4100- 0.5500 [25]
10	Water	298.15- 323.15	0.125	ZnO	0.50	Ag	0.50	0.6100- 0.7880 [26]
11	Water	320.15	0.00- 4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	-	0.6150- 0.6620 [27]
12	Water	320.15	1.00	CuO	1.00	-	-	0.6200- 0.6380 [28]
13	Water	303.15	0.10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20,0.40, 0.60, 0.80	MWCNT	0.20, 0.40, 0.60, 0.80	0. 6170- 0.6207 [29]
14	Water	298.15	0.10- 0.30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	Cu, MWCNT	0.10	0.6280- 0.6480 [30]
15	Water	298.15- 323.15	0.25- 1.50	CuO, MgO	0.80	MWCNT	0.20	0.6200- 0.7140 [31]
16	Water	300.15	0.99- 4.35	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub>	1.00	-	-	0.6100- 0.8100 [32]
17	Water	298.15	0.00- 8.00	CuO	1.00	-	-	0.6070- 0.7200 [33]
18	Water	288.15- 333.15	0.00- 0.50	CuO	0.60	MgO	0.40	0.5800- 0.9400 [34]



No	Base fluid	Temperature (K)	$\phi$ (Vol%)	Nanoparticle 1	Nanoparticle 1 (Fraction)	Nanoparticle 2	Nanoparticle 2 (Fraction)	Thermal conductivity (W/m.K)
19	Water	293.15- 353.15	0.00- 1.00	Ag, MWCNT	1.00		0.00	0.5760- 0.8000 [35]
20	Water-EG (60:40)	303.15- 343.15	0.00- 0.60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	CuO	0.50	0.4160- 0.4900 [36]
21	Water-EG (60:40)	303.15- 353.15	0.00- 3.00	TiO <sub>2</sub>	0.50	SiO <sub>2</sub>	0.50	0.4150- 0.5470 [37]
22	Water	298.15	0.00- 10.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	-	0.5984- 0.7895 [38]
23	Water, EG	298.15- 323.15	3.70- 9.30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	-	0.6436- 0.7637 [39]
24	Water, EG	298.15- 338.15	0.40- 2.00	CuO	1.00	-	-	0.6233- 0.6972 [40]
25	Water-EG (70:30)	303.15	0.01- 0.45	GO	1.00	-	-	0.4650- 0.5450 [41]
26	Water	321.15	0.25- 2.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , GNP, CuO, MWCNT	1.00	-	-	0.6400- 0.8200 [42]

### 3.2.2 การเก็บข้อมูลจุกความร้อนจำเพาะของของไหลไฮบริดนาโน

ข้อมูลมาจากงานวิจัย 28 งานวิจัย จำนวน 1158 ข้อมูลนำไปเปลี่ยนแปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยเดียวกันดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจุกความร้อนจำเพาะ

No	Base fluid	Temperature (K)	$\phi$ (Vol%)	Nanoparticle 1	Nanoparticle 1 (Fraction)	Nanoparticle 2	Nanoparticle 2 (Fraction)	Specific heat kJ/kg.K
1	Water	298.15-338.15	0.50- 1.00	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.33	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.33	3.6200- 4.0700 [13]
2	Water	293.15-333.15	0.00- 0.50	SWCNT	1.00	-	0.00	2.5000- 4.2000 [23]
3	Water	293.15-333.15	0.00- 2.50	SWCNT	1.00	-	0.00	3.0000- 4.2000 [24]
4	Water-EG (70:30)	278.15-313.15	0.00	MWCNT	1.00	-	0.00	3.4500- 3.8600 [43]
6	Water	298.15-338.15	0.33- 1.67	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	ZnO	0.50	2.9000- 8.4000 [44]
7	Water	300.15	0.00- 4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	3.4300- 4.1800 [27]
8	Water	300.15	1.00	CuO	1.00	-	0.00	3.7600- 3.9600 [28]
9	Water	303.15	0.10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-1	MWCNT	0-1	4.1700- 4.1800 [29]
10	Water	298.15	0.10- 0.30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	Cu, MWCNT	0.10	4.1700- 4.1800 [30]
11	Water	293.15-323.15	0.25- 2.00	CuO, MgO, MWCNT	0.80	MWCNT	0.20	3.5000- 4.4300 [31]
12	Water	300.15	0.99- 3.16	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	4.0700- 4.9800 [32]
13	Water	298.15	2.00- 8.00	CuO	0.00	-	0.00	2.7000- 4.1800 [33]
14	Water	288.15-333.15	0.10- 0.50	CuO	0.60	MgO	0.30	4.0700- 4.6800 [34]
15	Water	298.15-338.15	0.13- 0.39	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	4.0000- 4.2500 [45]
16	Water	293.15-353.15	0.00	0	0.00	-	0.00	4.1800- 4.2000 [35]
17	Water	293.15-313.15	0.00- 0.03	MWCNT	0.40	CuO	0.60	4.1700- 4.1800 [46]
18	Water-EG (60:40)	303.15	0.00- 0.60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	CuO	0.50	2.2400- 3.0900 [36]
19	Water	298.15	0-10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	3.1300- 4.1800 [38]
20	Water	296.15-336.15	3.70- 9.30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	3.2700- 3.7900 [39]
No	Base fluid	Temperature	$\phi$	Nanoparticle	Nanoparticle	Nanoparticle	Nanoparticle	Specific heat

		(K)	(Vol%)	1	1 (Fraction)	2	2 (Fraction)	kJ/kg.K
21	Water	298.15-338.15	0.40- 2.00	CuO	1.00	-		3.7500- 4.0900 [40]
22	Water-EG (70:30)	303.15	0.01- 0.05	GO	1.00	-		3.1800- 3.4400 [41]
23	Water	298.15-323.15	0.25- 1.50	CuO, MgO, SnO <sub>2</sub>	0.80	MWCNT	0.20	3.6500- 4.0700 [47]
24	Water	298.15	0.01	TiO <sub>2</sub>	1.00	-	0.00	4.1600- 4.1700 [48]
25	Water	303.15-333.15	0.25-2.0	TiO <sub>2</sub>	1.00	-	0.00	3.6300- 4.1500 [49]
26	Water	321.15	0.25- 2.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , CuO, GNP, MWCNT	1.00	-	0.00	3.5500- 4.3100 [42]
27	Water	298.15-323.15	4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub>	1.00	-		4.0400- 4.1800 [50]
28	Water	303.13-333.15	0.00- 0.39	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-		4.0000- 4.2500 [51]

### 3.2.3 การเก็บข้อมูลความหนืดของไหลไฮบริดนาโน

ข้อมูลมาจากงานวิจัย 32 งานวิจัย จำนวน 1566 ข้อมูลนำไปเปลี่ยนแปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยเดียวกันดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลความหนืด

No	Base fluid	Temperature (K)	$\phi$ (Vol%)	Nanoparticle 1	Nanoparticle 1 (Fraction)	Nanoparticle 2	Nanoparticle 2 (Fraction)	Viscosity (mPa/s)
1	Water	293.15-313.15	0.00- 0.40	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	MWCNT	0.80	0.6500- 1.2000 [52]
2	Water-EG (60:40)	303.15-353.15	0.00- 1.00	TiO <sub>2</sub>	0.20, 0.40, 0.5, 0.6, 0.80	SiO <sub>2</sub>	0.20, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80	0.9000- 3.0000 [19]
3	Water-EG (50:50)	273.15-313.15	0.14- 0.71	MWCNT	1.00	-	-	1.1000- 2.2500 [53]
4	Water	293.15-333.15	0.01	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.40	TiO <sub>2</sub>	0.40	1.0100- 1.5100 [54]
5	Water	293.15-333.15	0.00- 3.00	MWCNT	0.26	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.74	0.3000- 1.0000 [20]
6	Water-EG (70:30)	283.2	0.00	MWCNT	0.20	TiO <sub>2</sub>	0.80	0.8000- 6.5000 [55]
7	Water	293.15-323.15	0.00- 2.00	ZnO	0.50	Ag	0.50	0.8000- 1.7800 [56]
8	Water-EG (60:40)	303.15-353.15	0.02- 0.10	TiO <sub>2</sub>	0.80	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	0.8000- 4.2000 [21]
9	Water	298.15-333.15	0.02- 0.80	MgO	0.50	MWCNT	0.50	1.0000 -4.5000 [57]
10	Water	293.15-333.15	0.25- 1.00	TiN	1.00	-	0.00	1.2000- 9.0000 [22]
11	Water	293.15-333.15	0.00- 0.50	SWCNT	1.00	-	0.00	0.4500- 1.3800 [23]
12	Water	293.15-333.15	0.00- 0.25	SWCNT	1.00	-	1.00	0.5000- 1.3000 [24]
13	Water-EG (70:30)	278.15-313.15	0.00- 0.45	MWCNT	1.00	-	-	1.2000- 7.8000 [43]
14	Water-EG (60:40)	303.15-353.15	0.00-3.00	TiO <sub>2</sub>	0.50	SiO <sub>2</sub>	0.50	2.3500 [25]
15	Water	298.15-338.15	0.33-1.67	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	ZnO	0.50	1.5000- 1.800 [44]
16	Water	293.15-333.15	1.00- 0.40	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.35-7.8000 [58]
17	Water	293.15-333.15	1.00- 9.40	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.50-4.300 [59]
18	Water-EG (60:40)	303.15-343.15	0.00- 2.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	1.0000- 16.0000 [60]
19	Water	300.15	0.00- 4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.7900 -7.5000 [27]

No	Base fluid	Temperature (K)	$\phi$ (Vol%)	Nanoparticle 1	Nanoparticle 1 (Fraction)	Nanoparticle 2	Nanoparticle 2 (Fraction)	Viscosity (mPa/s)
20	Water	300.15	1.00	CuO	1.00	-	0.00	1.4770- 1.4800 [28]
21	Water	303.2	0.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1	MWCNT	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1	0.9100- 0.9900 [29]
22	Water	298.2	0.10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	Cu, MWCNT	0.10	0.9500- 1.0100 [30]
23	Water	298.15- 323.15	0.25-2.00	CuO, MgO	0.80	MWCNT	0.20	0.5500- 1.2700 [31]
24	Water	298.15	0.00- 8.00	CuO	0.00	-	0.00	1.0000 -5.6000 [61]
25	Water	288.15- 353.15	0.00 -0.50	CuO	0.60	MgO	0.40	0.4800- 1.6800 [34]
26	Water	293.15- 353.15	0.00- 1.00	Ag, MWCNT	0.00	-	0.00	0.6100- 2.6900 [35]
27	Water-EG (60:40)	303.15- 343.15	0.00- 0.60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	CuO	0.50	0.9800- 4.7300 [36]
28	Water-EG (60:40)	303.15- 353.15	0.00- 3.00	TiO <sub>2</sub>	0.50	SiO <sub>2</sub>	0.50	0.9500- 3.1500 [37]
29	Water	298.2	0.0- 10.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.00	1.0200- 2.9600 [38]
30	Water	278.15- 313.15	0.00- 4.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.6500- 2.0800 [62]
31	Water	321.15	0.25	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , CuO, GNP, MWCNT	1.00	-	0.00	0.5500- 0.8200 [42]
32	Water	303.2	0.00-0.38	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.00	0.5300-0.8800 [51]

### 3.2.4 การเก็บข้อมูลความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน

ข้อมูลมาจากงานวิจัย 30 งานวิจัย จำนวน 866 ข้อมูลนำไปเปลี่ยนแปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยเดียวกันดังตารางที่ 3.4  
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลความหนาแน่น

No	Base fluid	Temperature (K)	$\phi$ (Vol%)	Nanoparticle 1	Nanoparticle 1 (Fraction)	Nanoparticle 2	Nanoparticle 2 (Fraction)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
1	Water	293.15- 313.15	0.00- 0.30	MWCNT	0.26	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.74	0.9985- 1.0360 [20]
2	Water-EG (60:40)	273.15- 323.15	0.00- 10.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZnO	1.00	-	0.00	1.0743- 1.3586 [63]
3	Water-EG (60:40), (40:60)	293.15- 333.15	0.25- 1.00	TiN	1.00	-	0.00	1.064- 1.1180 [22]
4	Water	294.15- 309.15	0.00- 0.30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.00	0.9930- 1.1000 [64]
5	Water	300.15	2.00- 4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	1.005- 1.1000 [27]
6	Water	300.15	1.00- 2.00	CuO	1.00	-	0.00	1.1049- 1.9510 [28]
7	Water	303.15	0.10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00	MWCNT	0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00	0.9973- 0.9988 [29]
8	Water	298.15	0.10- 0.30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	Cu, MWCNT	0.10	1.0011- 1.0047 [30]
10	Water	298.15	0.00- 8.00	CuO	1.00	-	0.00	1.000- 1.5100 [33]
11	Water	288.15- 333.15	0.00- 0.50	CuO	0.60	MgO	0.40	0.9840- 1.0180 [34]
12	Water	283.15- 313.15	0.13- 0.39	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.9998- 1.0110 [45]
13	Water	293.15- 353.15	0.00 -1.00	0	1.00	-	0.00	0.9718- 0.9982 [35]
14	Water	293.15- 313.15	0.00	MWCNT	0.40	CuO	0.60	0.9920-0.9982 [46]
15	Water-EG (60:40)	303.15	0.20- 0.60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	CuO	0.50	1.0435-1.0962 [36]
16	Water	298.15	0.00- 10.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.00	0.9980 [38]
17	Water-EG (60:40)	298.15	0.00 -4.00	ZnO	1.00	-	0.00	1.1078-1.3194 [65]
18	Water	278.15- 313.15	0.00- 4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.00	0.9900-1.1100 [62]
19	Water	293.15- 313.15	0.10- 2.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.9970-1.0520 [66]
20	EG	283.15- 333.15	0.12- 0.48	MWCNT	1.00	-	0.00	1.0849- 1.1272 [67]
21	Water	298.15	0.01	TiO <sub>2</sub>	1.00	-	0.00	0.9957- 1.0043 [48]
22	Water	298.15- 313.15	0.20- 1.04	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.00	-	0.00	1.0488- 1.0565 [68]
23	Water	303.15- 333.15	0.25- 2.00	TiO <sub>2</sub>	1.00	-	0.00	1.0280- 1.0820 [49]
24	Water	321.15	0.25- 2.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , CuO, GNP, MWCNT	1.00	-	0.00	0.9850- 1.1500 [42]
No	Base fluid	Temperature	$\phi$ (Vol%)	Nanoparticle	Nanoparticle	Nanoparticle	Nanoparticle	Density

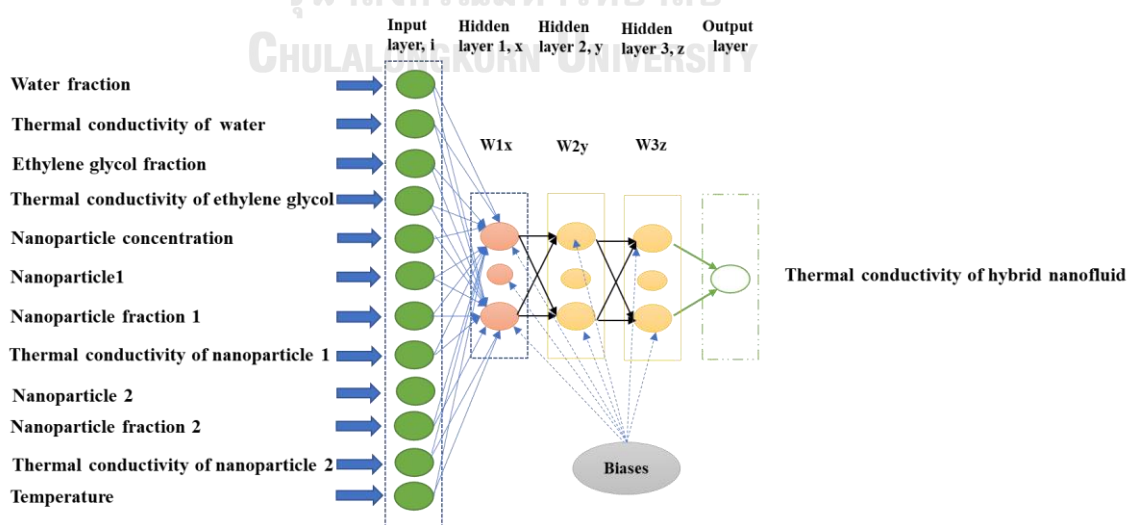
		(K)		1	1 (Fraction)	2	2 (Fraction)	(g/cm <sup>3</sup> )
25	Water	298.15- 313.15	0.05- 4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub>	1.00	-	0.00	0.9980- 1.1600 [69]
26	Water	300.15- 350.15	44713.000	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.9750- 1.1750 [70]
27	Water	298.15- 323.15	4.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub>	1.00	-	0.00	0.9980- 1.0260 [50]
28	Water	303.15- 333.15	0.00- 0.39	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	-	0.00	0.9810- 1.0187 [51]
29	EG	303.15- 323.15	0.00- 1.00	Ag	1.00	-	0.00	1.1060- 1.1360 [71]
30	Water	303.15- 363.15	0.00- 1.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	-	0.00	0.9680- 1.0400 [72]

### 3.3 ออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม

โปรแกรมที่ใช้สำหรับสร้างโครงข่ายประสาทเทียมคือ Matlab2021a ก่อนจะออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม ต้องทำการหาจำนวนนิวรอน ที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม ระหว่าง 1- 20 หลังจากนั้นจึงหาจำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) ที่เหมาะสมสำหรับสร้างโครงข่ายประสาทเทียม 1-2 เมื่อได้จำนวนนิวรอน และจำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) จึงนำไปสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

#### 3.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน

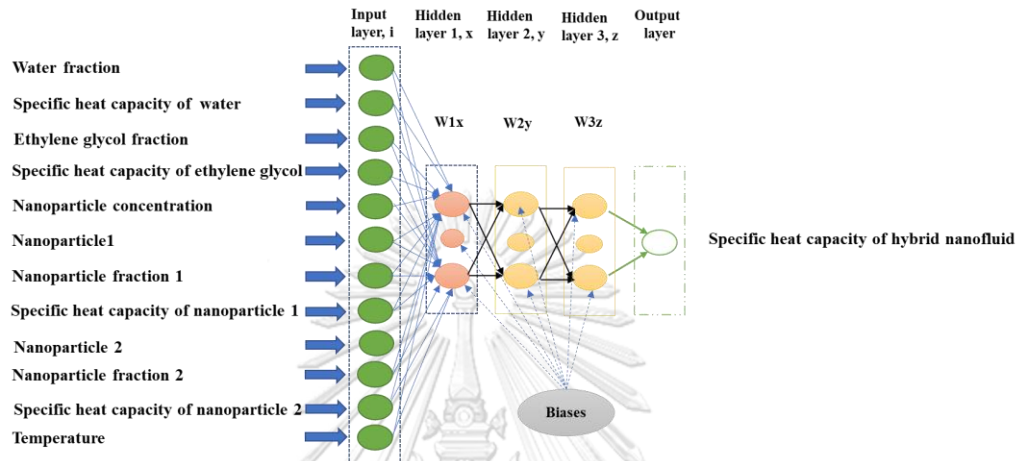
เมื่อได้จำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจึงทำการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมตามรูปภาพที่ 3.1 และทำการหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับทำนายการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน



รูปที่ 3.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายการนำความร้อน

### 3.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับค่าความร้อนจำเพาะของของไหลไฮบริดนาโน

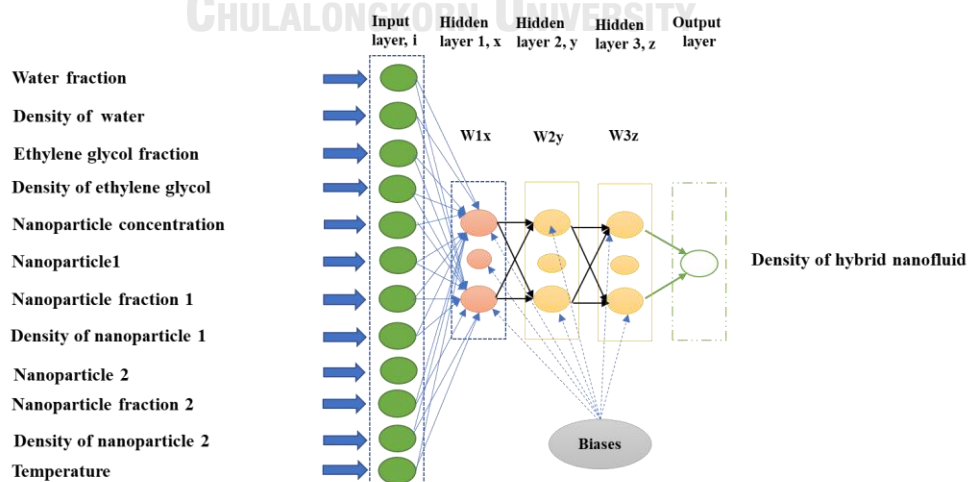
เมื่อได้จำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจึงทำการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมตามรูปภาพที่ 3.2 และทำการหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับทำนายความจุความร้อนจำเพาะของของไหลไฮบริดนาโน



รูปที่ 3.2 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความจุความร้อนจำเพาะ

### 3.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับค่าความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน

เมื่อได้จำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจึงทำการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมตามรูปภาพที่ 3.3 และทำการหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับทำนายความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน

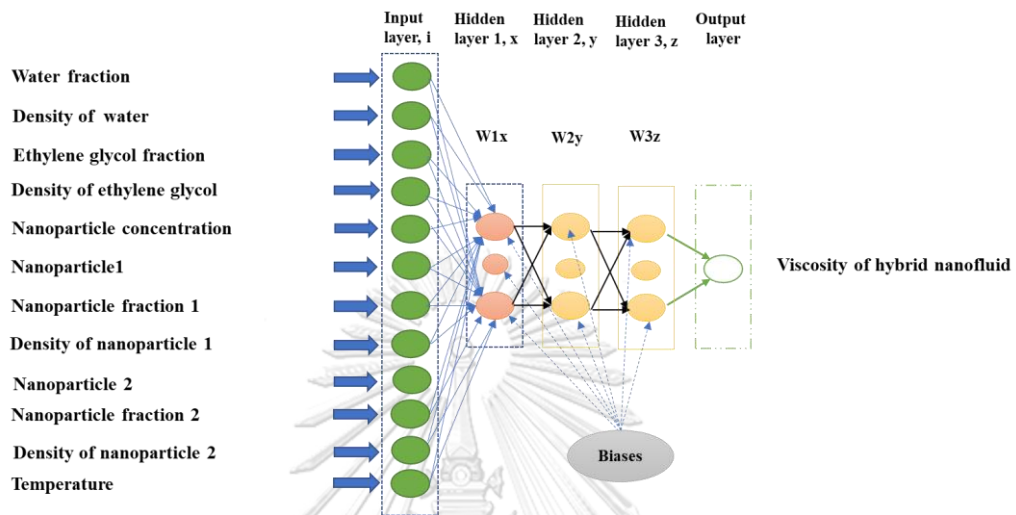


รูปที่ 3.3 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนาแน่น

### 3.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับค่าความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน



เมื่อได้จำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจึงทำการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมตามรูปภาพที่ 3.4 และทำการหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน



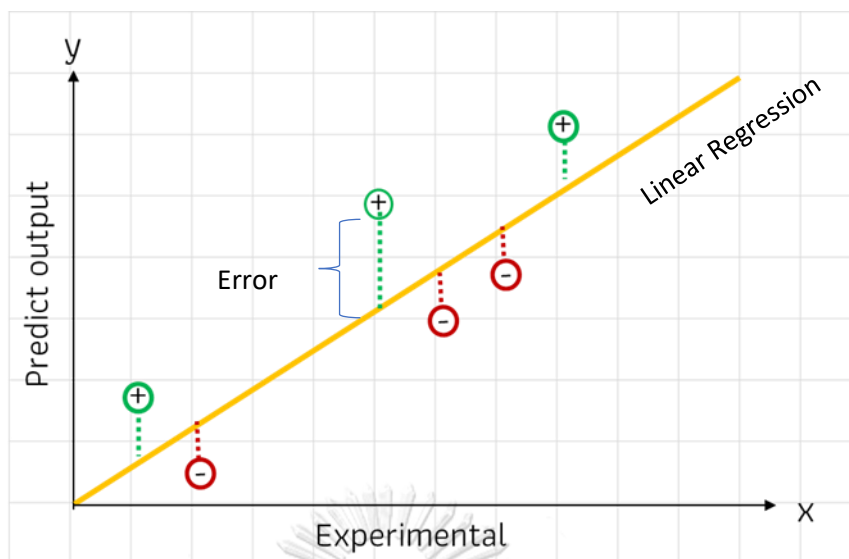
รูปที่ 3.4 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนืด

### 3.4 การประเมินโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อสร้างโครงข่ายประสาทเทียม ลำดับถัดมาคือการประเมินโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพและสามารถไปใช้งานได้หรือไม่ โดยดูจากค่าคลาดเคลื่อน โดยใช้ Error function หรือ “Loss function” เริ่มจากการสร้างโมเดล โดยเป้าหมายของโมเดลคือต้องการค่า Loss ให้มีค่าต่ำที่สุด จากรูปที่ 3.5 เส้นสีเหลือง คือ Linear regression ส่วนจุดสีเขียว และสีแดง คือ prediction ที่ได้จากการ train Linear regression ระยะห่างของ prediction และ actual คือค่า Loss function ที่เราต้องการค่าน้อยที่สุด

$$Error = y_i - \hat{y} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ค่าจริง และ  $\hat{y}$  คือค่าที่ได้จากการทำนาย



รูปที่ 3.5 ลักษณะ Linear regression

#### 3.4.1 ค่า R

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร ค่าจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 ซึ่งหากมีค่าใกล้ -1.0 นั้นหมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้าม หากมีค่าใกล้ +1.0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันโดยตรงอย่างมาก และหากมีค่าเป็น 0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2)$$

#### 3.4.2 ค่า MSE

MSE ย่อมาจาก “Mean squared error” คือ ค่า (Error) ยกกำลังสองแล้วนำมาหารด้วยข้อมูลทั้งหมด เพื่อหาค่าเฉลี่ยหาได้จากสมการ (3.3) โดยค่าที่เข้าใกล้ 0 แสดงถึงความใกล้เคียงของค่าจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้รูปแบบปรับตัวการเรียนรู้แบบ Gradient Descent with Momentum Weight and Bias (LEARN GDM) ซึ่งทำให้หาค่า Function loss ได้ไว ส่งผลให้ใช้เวลาในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมน้อยลง

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (3.3)$$

## 3.4.3 ค่า MAE

MAE ย่อมาจาก “Mean absolute error” คือค่าผลรวมของค่า (Error) สมบูรณ์ ที่หารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด เพื่อเปลี่ยนเป็นค่าเฉลี่ย หาได้จากสมการ (3.4) โดยค่า (Error) สมบูรณ์ อยู่ระหว่าง 0 -1 ซึ่งผลการทำนายที่ได้ค่า (Error) สมบูรณ์ที่เข้าใกล้ 0 แสดงถึงความใกล้เคียงของค่าจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$y_i$	คือ ค่าจริง
$\hat{y}$	คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย
$\bar{y}$	คือ ค่าเฉลี่ยของค่าจริง
$n$	คือ จำนวนข้อมูล



### 3.5 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน

เมื่อได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีความถูกต้องแล้ว จึงทำการใช้โครงข่ายประสาทเพื่อทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโน โดยต้องเลือกองค์ประกอบของของไหลไฮบริดนาโน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ทั้งนี้ตั้งแต่มีการค้นพบของไหลไฮบริดนาโน นักวิจัยจำนวนพยายามวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้ ของไหลไฮบริดนาโนมีค่าการนำความร้อนที่สูงขึ้น โดย Lee และคณะ [73] และ Wang และคณะ [74] ทำการใช้กลุ่มโลหะ เช่น Cu และ Ag ซึ่งส่งผลเหมือนกับใช้กลุ่มโลหะออกไซด์ CuO และ Ag<sub>2</sub>O และพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน คือ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน ดังนั้นงานวิจัยจึงเลือกองค์ประกอบของไฮบริดนาโน โดยมีส่วนประกอบ ดังนี้

1. ของไหลพื้นฐาน คือ น้ำ
2. ของแข็งอนุภาคนาโน แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่
  1. กลุ่มโลหะออกไซด์ เช่น Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> MgO และ CuO
  2. กลุ่มพอลิเมอร์ที่มีค่าการนำความร้อนที่สูง คือ MWCNT ท่อคาร์บอนนาโนผนังหลายชั้น (Multiwall carbon nanotube)

จากกำหนดส่วนประกอบของของไหลไฮบริดนาโนจึงนำอนุภาคนาโนทั้ง 2 กลุ่ม ละลายในของไหลพื้นฐานคือ น้ำ จะได้ของไหลไฮบริดนาโน 6 ชนิด และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มีจะได้ของไหลของไฮบริดนาโน 4 ชนิด ซึ่งจะได้ของไหลไฮบริดนาโนที่มีในฐานข้อมูลที่ปรากฏในตารางที่ 3.5 โดยใช้ความเข้มข้นที่ 1% vol และอัตราส่วนของอนุภาคนาโน 0.5 เท่ากัน หลังจากนั้นจึงใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายค่าการนำความร้อน และเลือกของไหลไฮบริดนาโนที่มีค่าการนำความร้อนที่ดีที่สุดไปประยุกต์ใช้การถ่ายโอนความร้อน

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบของไหลไฮบริดนาโน

Water fraction.	EG fraction	Temperature (K)	Nano particle (%vol)	Nano particle 1	Nano particle 1 fraction	Thermal conductivity Nano particle 1	Nano particle 2	Nano particle 2 fraction	Thermal conductivity Nano particle 1	Thermal conductivity (W/m.K)
1.00	0.00	303.0	1.000	CuO	0.50	77	MgO	0.50	42.0	0.7736
1.00	0.00	303.0	1.000	CuO	0.50	77	MWCNT	0.50	3000.0	0.6249
1.00	0.00	303.0	1.000	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.50	18	MWCNT	0.50	3000.0	0.6160
1.00	0.00	303.0	1.000	MgO	0.50	42	MWCNT	0.50	3000.0	0.6048

จากตารางที่ 3.5 พบว่าของไหลไฮบริดนาโนที่มีค่าการนำความร้อนที่ดีสามลำดับแรกนำไปหาค่าการนำความร้อนโดยโครงข่ายประสาทเทียม จากอุณหภูมิ 293.15-348.15 K โดยจะได้ผลค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริด

Temperature (K)	Hybrid nanofluid 1 (MWCNT+CuO)	Hybrid nanofluid 2 (MWCNT+Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Hybrid nanofluid (CuO+MgO)
293.15	0.6142	0.4494	0.7457
294.15	0.6151	0.4547	0.7468
295.15	0.6161	0.4600	0.7479
296.15	0.6171	0.4655	0.7493
297.15	0.6181	0.4710	0.7507
298.15	0.6191	0.4766	0.7522
299.15	0.6202	0.4823	0.7538
300.15	0.6213	0.4880	0.7556
301.15	0.6225	0.4937	0.7575
302.15	0.6237	0.4995	0.7596
303.15	0.6249	0.5054	0.7617
304.15	0.6262	0.5112	0.7641
305.15	0.6276	0.5170	0.7665
306.15	0.6290	0.5229	0.7692
307.15	0.6305	0.5287	0.7720
308.15	0.6320	0.5345	0.7749
309.15	0.6337	0.5403	0.7781
310.15	0.6354	0.5461	0.7814
311.15	0.6371	0.5519	0.7849
312.15	0.6390	0.5576	0.7887
313.15	0.6409	0.5633	0.7926
314.15	0.6429	0.5690	0.7967
315.15	0.6449	0.5746	0.8010
316.15	0.6471	0.5802	0.8056
317.15	0.6493	0.5857	0.8104
318.15	0.6516	0.5912	0.8154
319.15	0.6540	0.5967	0.8206
320.15	0.6564	0.6021	0.8261

Temperature (K)	Hybrid nanofluid 1 (MWCNT+CuO)	Hybrid nanofluid 2 (MWCNT+Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Hybrid nanofluid (CuO+MgO)
321.15	0.6589	0.6075	0.8318
322.15	0.6616	0.6128	0.8377
323.15	0.6643	0.6181	0.8438
324.15	0.6670	0.6233	0.8502
325.15	0.6699	0.6286	0.8568
326.15	0.6728	0.6337	0.8636
327.15	0.6759	0.6389	0.8706
328.15	0.6789	0.6440	0.8778
329.15	0.6821	0.6492	0.8852
330.15	0.6854	0.6542	0.8928
331.15	0.6887	0.6593	0.9005
332.15	0.6921	0.6644	0.9084
333.15	0.6956	0.6695	0.9165
334.15	0.6992	0.6745	0.9246
335.15	0.7028	0.6796	0.9329
336.15	0.7065	0.6847	0.9412
337.15	0.7103	0.6898	0.9496
338.15	0.7141	0.6949	0.9581
339.15	0.7180	0.7000	0.9665
340.15	0.7220	0.7052	0.9750
341.15	0.7261	0.7104	0.9834
342.15	0.7302	0.7156	0.9918
343.15	0.7343	0.7209	1.0000
344.15	0.7386	0.7262	1.0082
345.15	0.7428	0.7316	1.0162
346.15	0.7472	0.7370	1.0241
347.15	0.7515	0.7424	1.0317
348.15	0.7560	0.7479	1.0392

### 3.6 การประยุกต์ใช้การถ่ายโอนความร้อนในโปรแกรม Aspen plus

#### 3.6.1 การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม

ในกรณีศึกษากระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] นั้นมีอุปกรณ์และค่าควบคุมหลายตัว เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ จำเป็นต้องกำหนดอุปกรณ์และหาค่าควบคุมที่ทำให้ได้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ตามกรณีศึกษา โดยมีอุปกรณ์และค่าควบคุมมาตรฐานที่ต้องควบคุมเพื่อหาค่ามาตรฐาน ดังนี้

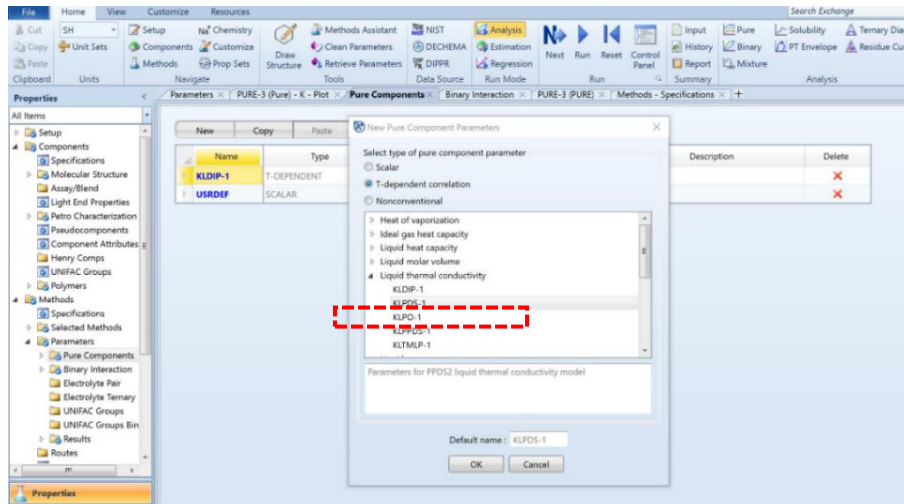
1. หอกลิ้น
  - ประเภทของหอกลิ้น จำนวนถาด
  - อัตราการไหล อุณหภูมิ ความดัน ชั้นที่ป้อนของวัตถุดิบเข้าหอกลิ้น
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
  - ประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
  - พื้นที่
  - ลักษณะการไหลของสาร
3. เครื่องแยก
  - อัตราการแยก

#### 3.6.2 การเพิ่มคุณสมบัติของของไหลไฮบริดนาโน

เมื่อได้โครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนแล้ว จึงนำค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนมาเพิ่มในฐานข้อมูลของโปรแกรม Aspen Plus ทำให้ได้ของไหลไฮบริดนาโนตามที่ต้องการ จากนั้นของไหลไฮบริดนาโนไปใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกรณีศึกษากระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] โดยต้องเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน โดยมีขั้นตอนดังนี้



1. กำหนด สารใหม่ (Pure component) เลือก KLPDS-1 หลังจากนั้นกด OK ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การสร้างสารประกอบใหม่

2. นำค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน ทั้ง 3 ชนิดจากตารางที่ 3.6 ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม มาเก็บในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเป็นฐานข้อมูล จากนั้นทำการหาค่าตัวสำหรับค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน โดยใช้ฟังก์ชัน = LINEST(F20:F75,D20:D75^(1,2,3,4)) โดยค่า F20:F75 ค่าอุณหภูมิ, D20:D75 ค่าการนำความร้อนจากอุณหภูมิ F20:F75 จะได้สัมประสิทธิ์ A-E

ตารางที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel

No	A	B	C	D	E
1	-5.52E+01	7.08E-01	-3.35E-03	7.00E-06	-5.41E-09
2	1.62E+02	-2.04E+00	9.65E-03	-2.02E-05	1.58E-08
3	-3.78E+02	4.84E+00	-2.31E-02	4.87E-05	-3.84E-08

3. ใส่ตัวแปรที่ 1-5 จากตารางที่ 3.5 ลงในโปรแกรม Aspen plus เพื่อเพิ่มตัวแปรสำหรับค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน ที่ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel หลังจากนั้นจะได้ค่าคงที่ลำดับที่ A-E และเติมลงที่ช่องที่ 1-5 ส่วนค่าคงที่ที่ 6 คือค่าอุณหภูมิต่ำสุด ตัวแปรที่ 7 คือค่าอุณหภูมิสูงสุด ดังรูปที่ 3.7

4. ตรวจสอบความถูกต้องของค่าคงที่ P1-P5 โดยแทนค่าในสมการ และตรวจสอบค่าการนำความร้อนที่ได้ ต้องตรงกับค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม

The screenshot shows the Aspen Plus V11 interface. The main window displays a table of 'Temperature-dependent correlation parameters' for components NP2 and NP3. The table has columns for Component, Source, Temperature units, Property units, and seven correlation coefficients (1-7). Below the table, a spreadsheet is visible with a formula bar containing  $=\text{LINEST}(F20:F75,D20:D75^{1,2,3,4})$ . The spreadsheet data includes columns for NP, P5, P4, P3, P2, and P1, with values ranging from -5.51529 to 161.6204.

Component	Source	Temperature units	Property units	1	2	3	4	5	6	7
NP2	USER	K	Watt/m-K	-55.1529	0.768459	-0.00335475	6.9999e-06	-5.41177e-09	273.15	1273.15
NP3	USER	K	Watt/m-K	161.62	-2.84337	0.00965197	-2.01635e-05	1.57648e-08	273.15	1273.15

รูปที่ 3.7 การใส่ค่าตัวแปร

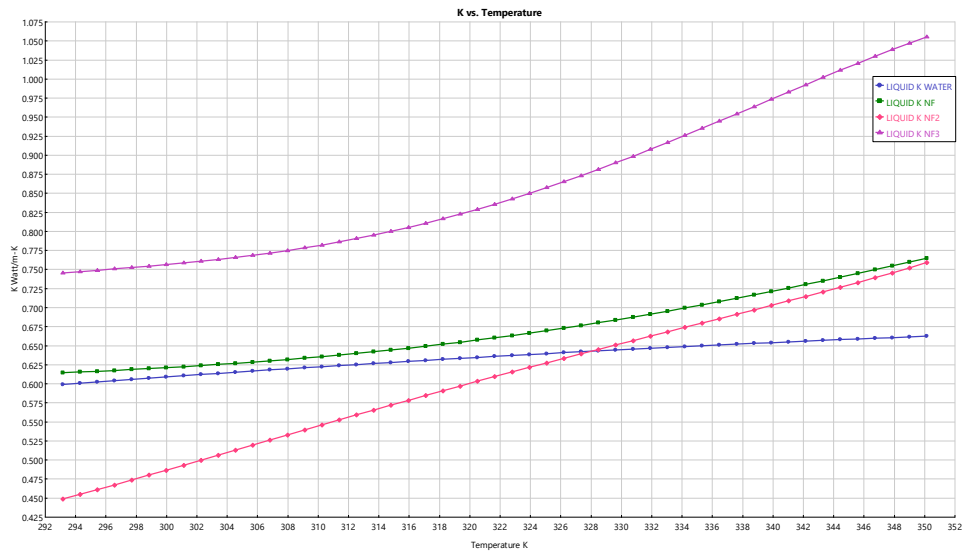
5. ระบุองค์ประกอบของสาร โดยกดเลือก Component เลือกสารที่ต้องการระบุ องค์ประกอบ กดเลือก User identify กด Next ใส่ Molecular weight 18.05 และกด Finish ดังรูปที่ 3.8

The screenshot shows the 'User-Defined Component Wizard' dialog box in Aspen Plus V11. The 'Component ID' is set to 'NF' and the 'Type' is 'Conventional'. The 'Alias' is 'H2O'. The 'Molecular weight' is set to 18.05. The 'Normal boiling point' is set to 100. The 'Ideal gas enthalpy of formation' and 'Ideal gas Gibbs energy of formation' are both set to 'Identical'. The 'Finish' button is highlighted.

รูปที่ 3.8 การใส่น้ำหนักโมเลกุล

6. การตรวจสอบผลการเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนา ตรวจสอบคุณสมบัติของของไหล โดยเลือก Analysis กดเลือก Pure ทำการเลือกไฮบริดนาที่ต้องการวิเคราะห์ ใส่อุณหภูมิ และกดเลือก Run analysis ผลของการเพิ่มค่า

การนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน หลังจากนั้นทำการเพิ่มของไหลไฮบริดนาโนเพื่อใช้เป็นตัวกลางสำหรับแลกเปลี่ยนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ครบทั้ง 3 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลของค่าการนำความร้อนเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ



### 3.7 การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปรในกระบวนการผลิต

การออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Design Expert .ใช้วิธี two-level factorial design และ การตอบสนองแบบพื้นผิว (Respond surface) โดยมีปัจจัย 9 ปัจจัย ที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดและสูงสุด ดังตารางที่ 3.8 จะได้การทดลองทั้งหมด 512 และ 2 ตัวแปรตอบสนอง ดังตารางที่ 3.9 เป็นตัวแปรในกระบวนการผลิตไฮโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] จะทำการทดสอบโดยโปรแกรม Aspen Plus และนำผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Aspen Plus และนำผลการทดลองที่ได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยโปรแกรม Design expert และหาค่าที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization) ในโปรแกรม Design expert ตารางที่ 3.8 ปัจจัยที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA และปริมาณมาณความร้อนที่ (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Parameter	Name	Type	Minimum	Maximum	Coded Low	Coded High	Mean	Std. Dev.
A	Reflux ratio	Numeric	0.66	0.74	-1 ↔ 0.66	+1 ↔ 0.74	0.6998	0.04
B	Bottom rate	Numeric	0.285	0.315	-1 ↔ 0.28	+1 ↔ 0.32	0.3000	0.015
C	Temperature feed2	Numeric	171	189	-1 ↔ 171.00	+1 ↔ 189.00	180.04	9.01
D	Pressure feed2	Numeric	1.05	1.12	-1 ↔ 1.05	+1 ↔ 1.12	1.08	0.035
E	Mole flowrate feed2	Numeric	0.168	0.185	-1 ↔ 0.17	+1 ↔ 0.18	0.1765	0.0085
F	Temperature cooling in	Numeric	22.5	27.5	-1 ↔ 22.50	+1 ↔ 27.50	25.00	2.5
G	Pressure cooling in	Numeric	4.75	5.25	-1 ↔ 4.75	+1 ↔ 5.25	5.00	0.2502
H	Mass flow in	Numeric	84	92	-1 ↔ 84.00	+1 ↔ 92.00	88.00	4
J	Area Heat exchanger	Numeric	459	507	-1 ↔ 459.00	+1 ↔ 507.00	483.09	24.02

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรตอบสนองสำหรับทดสอบความอ่อนไหว

Response	Name	Number of observations	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio
R1	Outlet product (IPA)	512	0.887418	0.999486	0.9715	0.0483	1.13
R2	Heat duty at heat exchanger	512	10325.6	15370.4	13180.8	1271.74	1.49

### 3.7.1 การทดสอบความอ่อนไหวด้วยโปรแกรม Aspen plus

การทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปรในกรณีศึกษากระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] เพื่อต้องการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต้น ดังตารางที่ 3.8 ที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และค่าความร้อนที่เครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน ดังตารางที่ 3.9 โดยสามารถทำได้ ดังนี้

1. เลือกที่ Model Analysis เลือก Sensitivity กดเลือก New เลือก S1 เลือก OK
2. กำหนดตัวแปรต้น (Vary) มีทั้งหมด 9 ตัวแปร ป้อนค่าตัวแปรและหน่วยให้ถูกต้อง ประกอบด้วย
  1. อัตราการป้อนกลับ Reflux ratio
  2. อัตราการไหลผลิตภัณฑ์ด้านล่าง (Bottom rate) หน่วย kg/sec
  3. อุณหภูมิสายป้อนที่ 2 (Temperature feed 2) หน่วย °C
  4. ความดันสายป้อนที่ 2 (Pressure feed 2) หน่วย bar
  5. อัตราการไหลสายป้อนที่ 2 (Flowrate feed 2) หน่วย kg/sec
  6. อุณหภูมิสารแลกเปลี่ยนความร้อน (Temperature cooling) หน่วย °C
  7. ความดันสารแลกเปลี่ยนความร้อน (Pressure cooling) หน่วย bar
  8. อัตราการไหลสารแลกเปลี่ยนความร้อน (Mass flowrate) หน่วย kg/sec
  9. พื้นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger area) หน่วย sqm
3. กำหนดตัวแปรตาม (Define) ป้อนค่าตัวแปรและหน่วยให้ถูกต้อง ประกอบด้วย
  1. อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Mole fraction)
  2. ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat duty at heat exchanger) W

4. กดเลือกที่ Cases และใส่ค่าตัวแปรต้น 1-9 จากตารางที่ 3.8 ให้ครบ โดยค่า 1 คือ ค่าสูงสุด และ ค่า -1 คือ ค่าต่ำสุด ให้ครบทั้ง 512 การทดลองที่ได้จากโปรแกรม Design expert หลังจากนั้นสั่งให้โปรแกรมคำนวณ (Run)

5. ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง ค่าตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนอง เมื่อไม่มีข้อผิดพลาด จึงนำผลการทดลองทั้ง 512 การทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรในโปรแกรม Design expert ต่อไป

### 3.7.2 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design expert

ทดสอบตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] ที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความอ่อนไหวของตัวแปร โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

1. การเพิ่มข้อมูล ทำการเพิ่มผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Aspen plus ทั้ง 512 การทดลอง ลงในโปรแกรม Design expert

1. เปิดโปรแกรม Design expert เลือก New design
2. ไปที่แถบ Custom design กดเลือก Import data set
3. ไปคัดลอกข้อมูลการทดลอง 512 การทดลอง กดเลือก Paste platform clipboard
4. กดเลือกที่แท็บด้านบนสุดตาราง (ชื่อตัวแปร) คลิกขวา เลือก Roll as name
5. กดเลือกที่หน่วย คลิกขวา เลือก Set column เลือก Numeric factor ทำให้ครบทั้ง 9 ตัวแปรต้น
6. กดเลือกที่ตัวแปรตอบสนอง IPA คลิกขวา เลือก Set column type เลือก Responds ค่า Heat at heat exchanger ทำเหมือนกัน
7. เมื่อทำครบแล้วกด Finish

2. เลือกวิเคราะห์ (Analysis) กดเลือก ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เลือกที่แถบ ANOVA ดูค่า P-value ถ้าค่าน้อยกว่า ค่าความเชื่อมั่นที่กำหนด ตัวแปรต้นนั้นจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นวิเคราะห์ค่าความร้อนที่ Heat exchanger ด้วยเช่นกัน

3. การหาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization) เลือก Numerical เลือกตัวแปรต้นทั้งหมด และตั้งค่าตัวแปรตอบสนองที่ต้องการที่จะศึกษาดังนี้

- 1) เลือก ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ที่แถบ Goal เลือก Maximize
- 2) เลือก ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่แถบ Goal เลือก Maximize

- 3) เลือก ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่แถบ Goal เลือก Maximize
  4. เลือกสร้างกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง (Respond surface plot) เพื่อดูความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีผลต่อไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
4. ทำการนำค่าตัวแปรต้นที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 การทดลองที่ได้ไปทดสอบในโปรแกรม Aspen plus เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และค่าความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบความอ่อนไหวของตัวต้นของการใช้ของไหลไฮบริดนาโนทั้ง 3 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบผลค่าไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



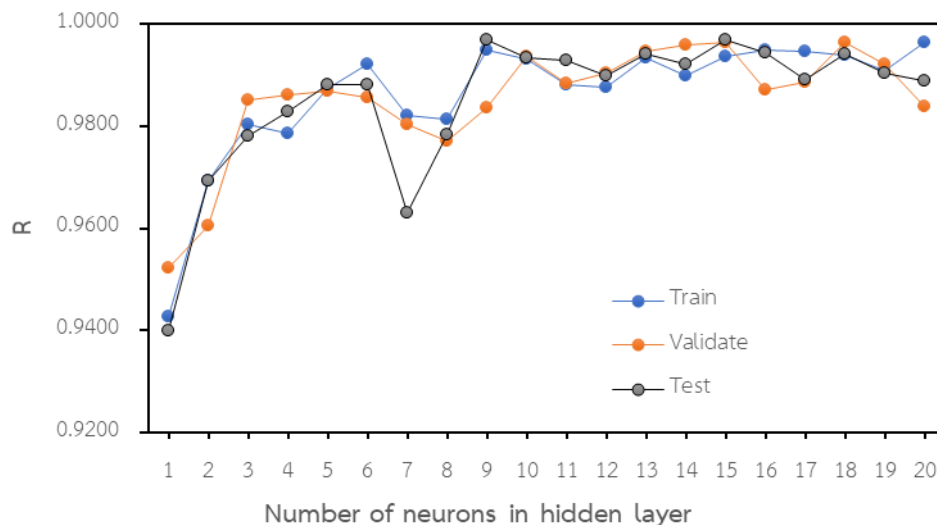
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการหาจำนวนนิวรอน ที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

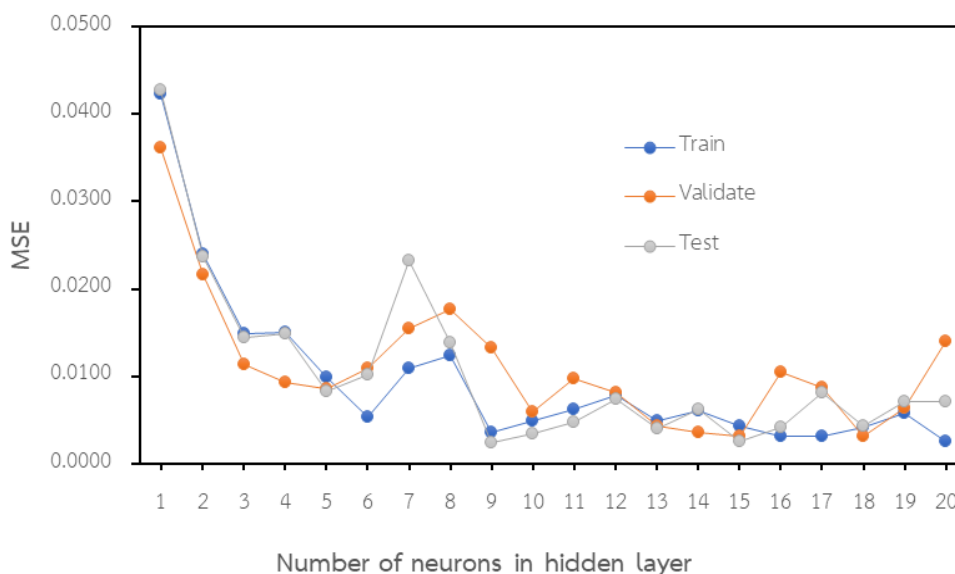
สำหรับการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมนั้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือการหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนที่หนึ่ง และชั้นซ่อนที่สอง ขั้นตอนต่อมาคือการนำจำนวนนิวรอนที่ได้ไปหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความหนืด และค่าความหนาแน่น

ผลการหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนที่หนึ่ง โดยใช้ข้อมูลจากความจุความร้อน สำหรับ Train Validate และ Test จะทำการทดสอบจาก 1- 20 นิวรอนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม โดยดูจากค่า R ที่เข้าใกล้ 1 และค่า MSE เข้าใกล้ 0 เมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟ ระหว่างการ Train Validate และ Test สำหรับค่า R จะได้ดังรูปที่ 4.1 และเมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟ ระหว่างการ Train Validate และ Test สำหรับค่า MSE จะได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟค่า R ต่อจำนวนนิวรอนของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่หนึ่ง

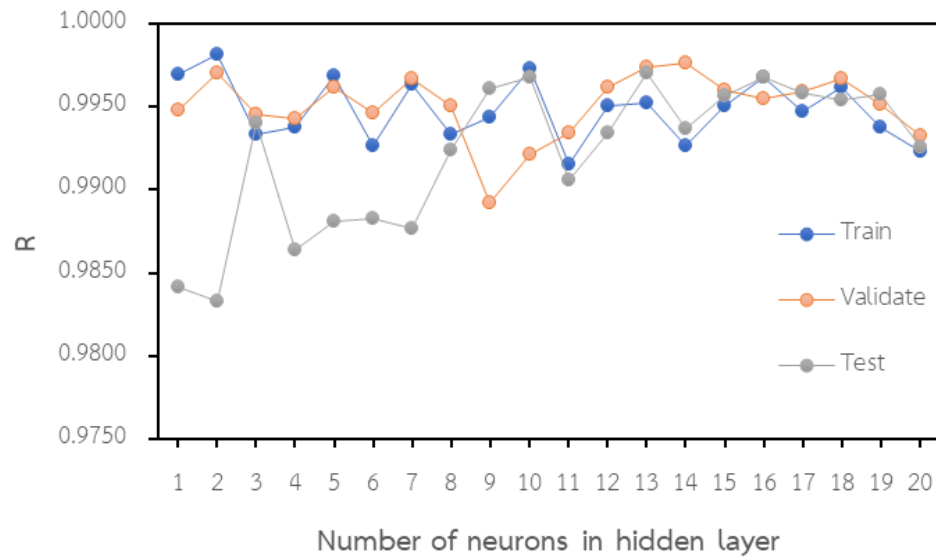




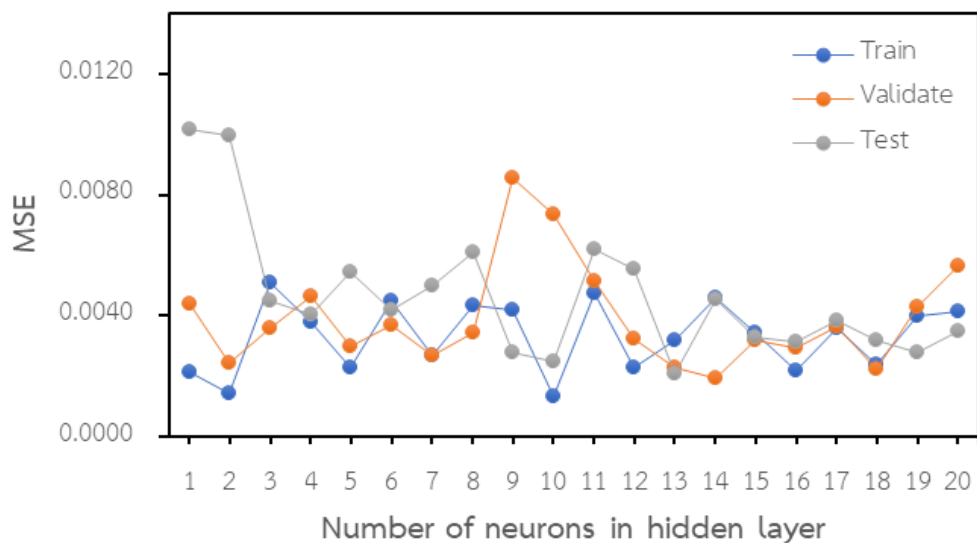
รูปที่ 4.2 กราฟค่า MSE ต่อจำนวนนิวรอนของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่หนึ่ง

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเมื่อจำนวนนิวรอนจาก 1- 6 นิวรอน มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า R และค่า MSE ลดลง จากการ Train Validate และ Test อย่างชัดเจน เมื่อจำนวนนิวรอนที่ 7-8 ผลของค่า R ลดลง และค่า MSE เพิ่มขึ้น โดยค่า R จากการ Train Validate ยังสูงกว่าค่า R จากการ Test หลังจากนิวรอนที่ 9 ค่า R เริ่มเพิ่มขึ้นตามค่า MSE ที่ค่อย ๆ ลดลง และมีแนวโน้มเดียวกันทั้งการ Train Validate และ Test จนถึงนิวรอนที่ 15 หลังจากนิวรอนที่ 15 ผลของค่า R และค่า MSE เริ่มไม่คงที่ และจะเห็นว่าจำนวนนิวรอนที่ 20 ผลของค่า R ลดลงและค่า MSE เพิ่มขึ้นจากการ Test แสดงถึงการฟิตกับข้อมูลชุด Train มากเกินไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกนิวรอนจำนวน 15 นิวรอนสำหรับชั้นซ่อนที่หนึ่งของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อไม่ให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความซับซ้อนมากเกินไป

เมื่อได้นิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนที่หนึ่งคือ 15 นิวรอน หลังจากนั้นทำการหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับชั้นซ่อนที่สอง โดยใช้จำนวนนิวรอน จาก 1- 20 นิวรอน โดยต้องการค่า R ที่เข้าใกล้ 1 และค่า MSE เข้าใกล้ 0 เมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟ ระหว่างการ Train Validate และ Test สำหรับค่า R จะได้ดังรูปที่ 4.3 และเมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟ ระหว่างการ Train Validate และ Test สำหรับค่า MSE จะได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 กราฟค่า R ต่อจำนวนนิวรอนของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่สอง



รูปที่ 4.4 ค่า MSE ต่อจำนวนนิวรอนของการ Train Validate และ Test ของชั้นซ่อนที่สอง

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อจำนวนนิวรอนจาก 1- 8 นิวรอน มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า R และค่า MSE ลดลง จากการ Train และ Validate ค่า R ต่ำและ MSE สูงของการ Test เมื่อจำนวนนิวรอนที่ 10-15 ผลของค่า R และค่า MSE เริ่มคงที่ มีแนวโน้มเดียวกันทั้งการ Train Validate และ Test หลังจากนิวรอนที่ 15 ผลของค่า R และค่า MSE เริ่มไม่คงที่ และผลของค่า R มีแนวโน้มลดลงและค่า MSE เพิ่มขึ้นจากการ Train Validate และ Test เนื่องจากจำนวนนิวรอนที่

มากขึ้นไปทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความซับซ้อนมากขึ้นไป ซึ่งถ้าหากมีการใช้จำนวนชั้นซ่อนที่มากขึ้นทำให้ได้โครงข่ายประสาทเทียมที่พิเศษเฉพาะกับข้อมูลชุดที่ Train ทำให้ได้ค่า R ที่ต่ำและ MSE ที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกนิเวรอนจำนวน 15 นิเวรอนสำหรับชั้นซ่อนที่สองของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อไม่ให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความซับซ้อนมากเกินไป

#### 4.2 ผลการหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

หลังจากได้จำนวนนิเวรอนที่เหมาะสมมาแล้ว หลังจากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าการนำความร้อน, ค่าความร้อนจำเพาะ, ค่าความหนืด และค่าความหนาแน่นโดยประกอบไปด้วย

1. ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม (Network type) ระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้าและส่งย้อนกลับ (FFBP) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้าและด้านข้าง (CFBP) พบว่า ประเภทโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมคือ โครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้าและส่งย้อนกลับ (FFB) เพราะโครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้าและด้านข้าง (CFBP) มีการส่งข้อมูลไปยังหลายชั้นจึงใช้เวลาในการสอนนาน และโครงข่ายมีความซับซ้อนมากเกินไป จึงเลือกใช้โครงข่ายแบบส่งข้อมูลไปข้างหน้าและส่งย้อนกลับ (FFB) เพื่อช่วยลดเวลาในการสอนและความซับซ้อนของโครงข่ายประสาทเทียม

2. จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) โดยพบว่าชั้นซ่อนที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมคือ คือ 2 ชั้นซ่อน เมื่อจำนวนชั้นซ่อน มากกว่า 2 ชั้น จะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีความซับซ้อนเกินไปจนเกิดการติดกับข้อมูลชุด Train ทำให้ได้ผลการทำนายไม่ดีเมื่อนำไปใช้งานจริง

3. ฟังก์ชันกระตุ้น (Active function) โดยพบว่าฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียมคือ Tansig function เพราะเหมาะกับโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้รูปแบบการปรับตัวการเรียนแบบเกรเดียนต์ (Gradient decent)

การหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายค่าการนำความร้อน โดยทำการทดสอบประเภทโครงข่ายประสาทเทียม จำนวนชั้นของชั้น และประเภทของฟังก์ชันกระตุ้น หลังจากนั้นทำการเลือกโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่า R เข้าใกล้ 1 และค่า MSE เข้าใกล้ 0

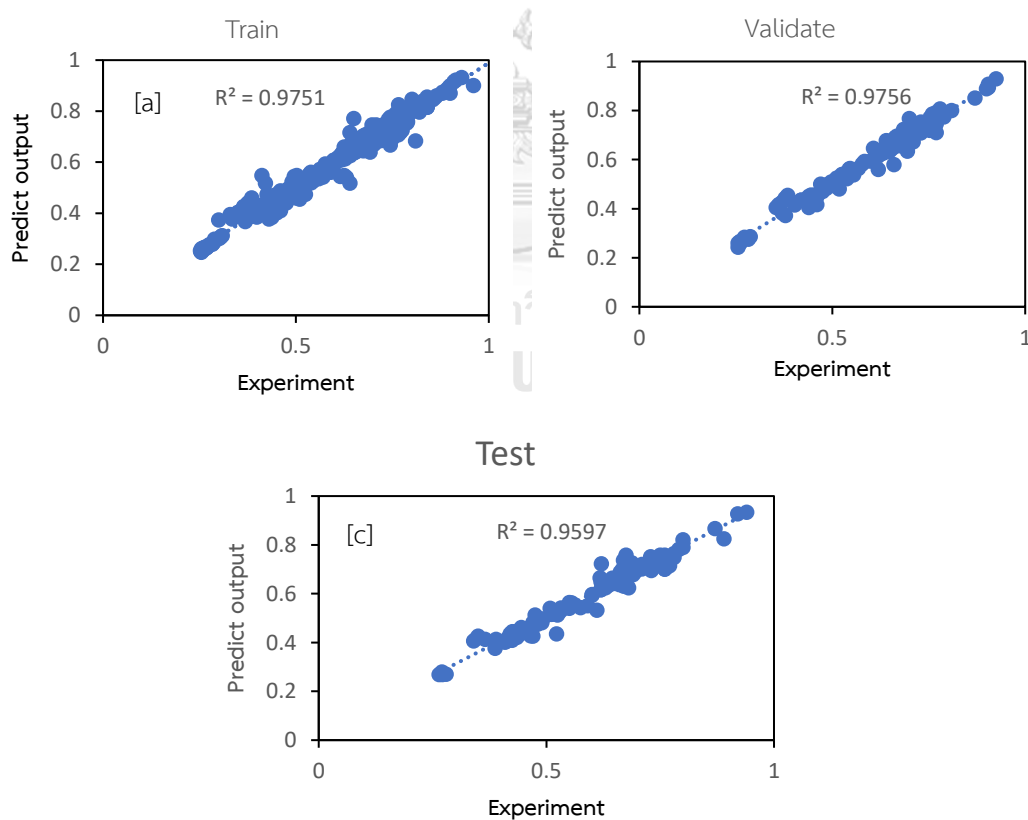
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายการนำความร้อนของไหลไฮบริดนาโน

NET	Number of layers	Transfer function	Topology	R			MSE		
				TRAIN	VALIDATE	TEST	TRAIN	VALIDATE	TEST
FFBP	1	Tansig	12-1	0.8599	0.8317	0.8862	0.0054	0.0051	0.0049
FFBP	2	Tansig- Tansig	12-15-1	0.9765	0.9741	0.9673	0.0005	0.0006	0.0004
FFBP	3	<b>Tansig- Tansig- Tansig</b>	<b>12-15-15-1</b>	0.9874	0.9877	0.9796	0.0005	0.0005	0.0008
FFBP	1	Logsig	12-1	0.0610	0.6064	0.4625	0.0226	0.0212	0.0230
FFBP	2	Logsig- Logsig	12-15-1	0.2199	0.1747	0.2506	0.0252	0.0251	0.0260
FFBP	3	Logsig- Logsig - Logsig	<b>12-15-15-1</b>	0.6651	0.7161	0.6887	0.0233	0.0216	0.0158
FFBP	1	Puerlin	12-1	0.8525	0.8755	0.8461	0.0055	0.0048	0.0057
FFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.8536	0.8717	0.8388	0.0054	0.0056	0.0057
FFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	<b>12-15-15-1</b>	0.8592	0.8144	0.8642	0.0052	0.0056	0.0065
CFBP	2	Tansig- Tansig	12-15-1	0.9618	0.9130	0.9412	0.0009	0.0035	0.0021
CFBP	3	Tansig- Tansig- Tansig	<b>12-15-15-1</b>	0.9779	0.9779	0.9707	0.0006	0.0010	0.0010
CFBP	2	Logsig- Logsig	12-15-1	0.6851	0.6098	0.7412	0.0222	0.0228	0.0196
CFBP	3	Logsig- Logsig - Logsig	<b>12-15-15-1</b>	0.7015	0.6091	0.6432	0.0212	0.0238	0.0231
CFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.8587	0.8621	0.8207	0.0054	0.0056	0.0056
CFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	<b>12-15-15-1</b>	0.8612	0.8531	0.8282	0.0053	0.0060	0.0060

ตารางที่ 4.2 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน

	R	R-square	MSE	MAE
Train	0.9874	0.9751	0.0005	0.0134
Validate	0.9877	0.9756	0.0005	0.0156
Test	0.9796	0.9597	0.0008	0.0189

จากการทดลองหาโครงข่ายที่เหมาะสมสำหรับค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน จะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่า R เข้าใกล้ 1 มากที่สุด และค่า MSE เข้าใกล้ 0 แสดงในตารางที่ 4.2 เลือก ที่ได้ค่า R เท่ากับ 0.9874 0.9877 และ 0.9796 และค่า MSE เท่ากับ 0.0005 0.0005 และ 0.0008 ค่า MAE เท่ากับ 0.0134 0.0156 และ 0.0189 จากการ Train Validate และ Test ตามลำดับ และสร้างเป็นกราฟวิเคราะห์ค่า  $R^2$  ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 กราฟค่า  $R^2$  ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของการนำความร้อน

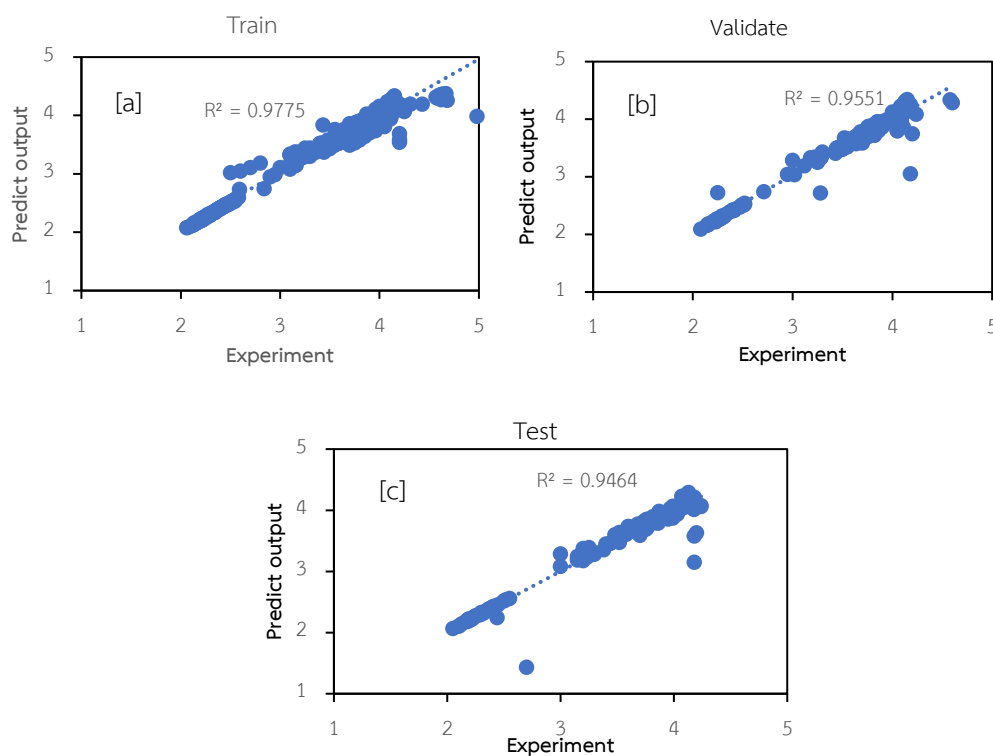
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความจุความร้อนจำเพาะของของไหลไฮบริดนาโน

NET	Number of layer	Transfer function	Topology	R			MSE		
				TRAIN	VALIDATE	TEST	TRAIN	VALIDATE	TEST
FFBP	1	Tansig	12-1	0.9465	0.9664	0.9350	0.0390	0.0286	0.0445
FFBP	2	Tansig- Tansig	12-15-1	0.9846	0.9529	0.9051	0.0085	0.0328	0.0754
FFBP	3	<b>Tansig- Tansig- Tansig</b>	<b>12-15-15-1</b>	0.9886	0.9775	0.9728	0.0084	0.0170	0.0230
FFBP	1	Logsig	12-1	0.7661	0.7849	0.7734	0.2756	0.2891	0.2254
FFBP	2	Logsig- Logsig	12-15-1	0.8060	0.8198	0.7957	0.2381	0.2709	0.2660
FFBP	3	Logsig- Logsig - Logsig	<b>12-15-15-1</b>	0.7717	0.7989	0.8325	0.2674	0.2378	0.1873
FFBP	1	Puerlin	12-1	0.9504	0.9304	0.9555	0.0370	0.0476	0.0347
FFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.9482	0.9593	0.9363	0.0372	0.0320	0.0502
FFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	<b>12-15-15-1</b>	0.9511	0.9424	0.9393	0.0354	0.0429	0.0485
CFBP	2	Tansig- Tansig	12-15-1	0.9746	0.9891	0.9885	0.0410	0.00670	0.0700
CFBP	3	Tansig- Tansig- Tansig	<b>12-15-15-1</b>	0.9631	0.9744	0.9741	0.0450	0.0450	0.0380
CFBP	2	Logsig- Logsig	12-15-1	0.8219	0.8263	0.7811	0.2287	0.3316	0.2456
CFBP	3	Logsig- Logsig - Logsig	<b>12-15-15-1</b>	0.8084	0.8056	0.7731	0.2483	0.2401	0.2692
CFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.9438	0.9648	0.9538	0.0422	0.0253	0.0328
CFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	<b>12-15-15-1</b>	0.9481	0.9459	0.9519	0.0389	0.0370	0.0367

ตารางที่ 4.4 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความจุความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน

	R	R-square	MSE	MAE
Train	0.9886	0.9775	0.0084	0.0503
Validate	0.9775	0.9551	0.0179	0.0672
Test	0.9728	0.9464	0.0230	0.0596

จากการทดลองหาโครงข่ายที่เหมาะสมสำหรับค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลไฮบริดนาโน จะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่า R เข้าใกล้ 1 มากที่สุด และค่า MSE เข้าใกล้ 0 แสดงในตารางที่ 4.4 ได้ค่า R เท่ากับ 0.9886 0.9775 และ 0.9728 และค่า MSE เท่ากับ 0.0084 0.0179 และ 0.0230 ค่า MAE เท่ากับ 0.0503 0.0672 และ 0.0596 จากการ Train Validate และ Test ตามลำดับ และสร้างกราฟค่า  $R^2$  ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.6 กราฟค่า  $R^2$  ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของความจุความร้อนจำเพาะ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน

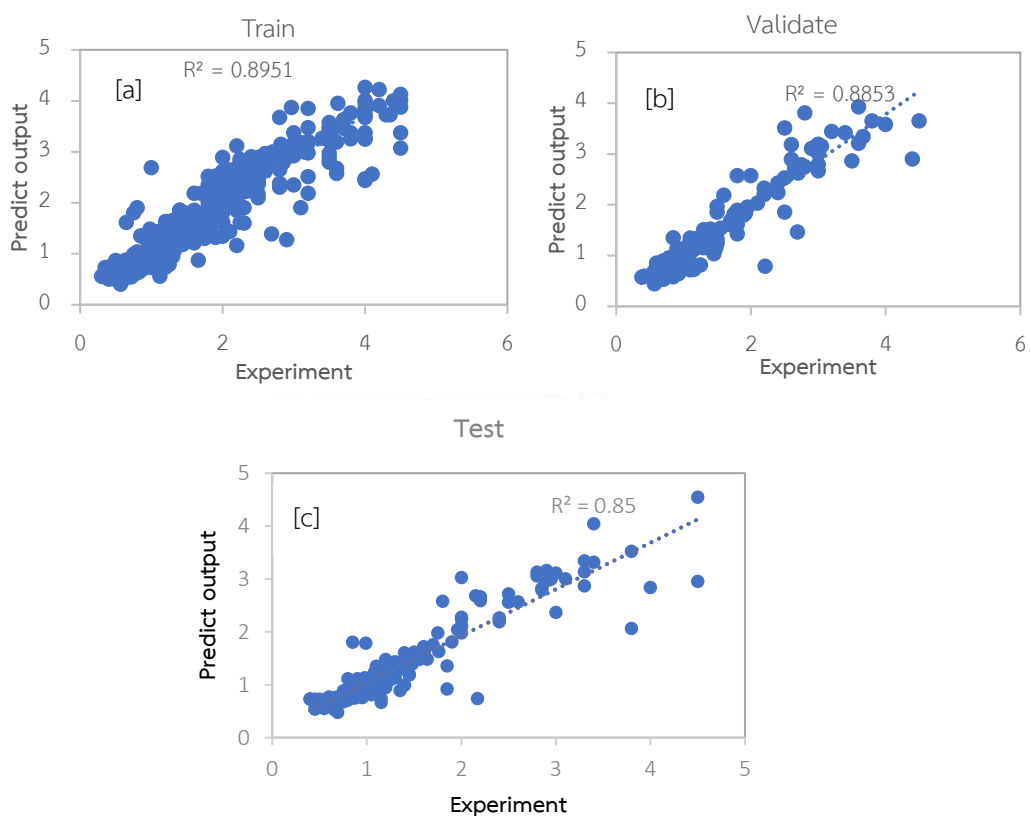
NET.	Layer	Transfer function	Topology	R			MSE		
				Train	Validate	Test	Train	Validate	Test
FFBP	1	Tansig	12-1	0.7753	0.7553	0.6624	0.3266	0.3280	0.4420
FFBP	2	Tansig-Tansig	12-15-1	0.9270	0.9078	0.8913	0.1068	0.1195	0.1420
FFBP	3	Tansig-Tansig-Tansig	12-15-15-1	0.9461	0.9409	0.9219	0.0841	0.0958	0.1150
FFBP	1	Logsig	12-1	0.3945	0.3860	0.2613	1.5680	1.5690	1.5720
FFBP	2	Logsig-Logsig	12-15-1	0.2284	0.3488	0.1302	1.5740	1.5590	1.6810
FFBP	3	Logsig-Logsig-Logsig	12-15-15-1	0.7095	0.7126	0.7451	1.4750	1.5390	1.5250
FFBP	1	Puerlin	12-1	0.7465	0.7195	0.6422	0.3653	0.3346	0.4795
FFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.7345	0.6910	0.7343	0.3743	0.4171	0.3475
FFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	12-15-15-1	0.7250	0.6834	0.7089	0.3667	0.4332	0.3466
CFBP	2	Tansig-Tansig	12-15-1	0.9431	0.9062	0.8929	0.0723	0.1693	0.1572
CFBP	3	Tansig-Tansig-Tansig	12-15-15-1	0.9479	0.9414	0.9347	0.0611	0.1052	0.1217
CFBP	2	Logsig-Logsig	12-15-1	0.7413	0.7506	0.7350	1.5130	1.4660	1.4630
CFBP	3	Logsig-Logsig-Logsig	12-15-15-1	0.7312	0.6885	0.6045	1.4710	1.4620	1.6120
CFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.7345	0.7380	0.6898	0.3737	0.3514	0.4073
CFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	12-15-15-1	0.7293	0.7400	0.7134	0.3913	0.2992	0.3758



ตารางที่ 4.6 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน

	R	R-square	MSE	MAE
Train	0.9461	0.8951	0.0841	0.1685
Validate	0.9409	0.8853	0.0958	0.1839
Test	0.9219	0.8500	0.1150	0.1936

จากการทดลองหาโครงข่ายที่เหมาะสมสำหรับความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน จะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่า R เข้าใกล้ 1 มากที่สุด และค่า MSE เข้าใกล้ 0 แสดงในตารางที่ 4.6 ได้ค่า R เท่ากับ 0.9461 0.9409 และ 0.9219 และค่า MSE เท่ากับ 0.0841 0.0958 และ 0.1150 ค่า MAE เท่ากับ 0.1685 0.1839 และ 0.1936 จากการ Train Validate และ Test ตามลำดับ และสร้างกราฟค่า  $R^2$  ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.7 กราฟค่า  $R^2$  ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของความหนืด

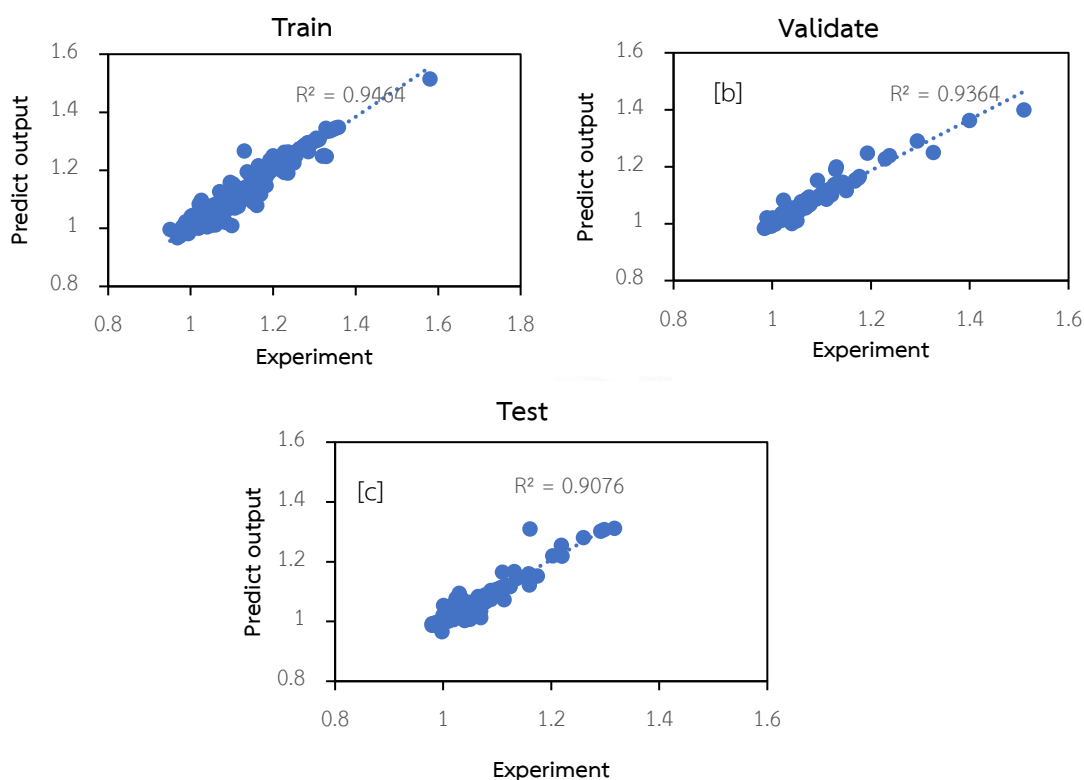
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน

NET	Layer	Transfer function	Topology	R			MSE		
				Train	Validate	TEST	Train	Validate	Test
FFBP	1	Tansig	12-1	0.8858	0.9243	0.9415	0.0014	0.0007	0.0005
FFBP	2	Tansig- Tansig	12-15-1	0.9314	0.9390	0.9600	0.0007	0.0010	0.0004
FFBP	3	<b>Tansig- Tansig- Tansig</b>	<b>12-15-15-1</b>	0.9676	0.9728	0.9526	0.0003	0.0004	0.0004
FFBP	1	Logsig	12-1	0.5301	0.3984	0.5044	0.0467	0.0453	0.0450
FFBP	2	Logsig- Logsig	12-15-1	0.4576	0.5424	0.6188	0.0461	0.0467	0.0475
FFBP	3	Logsig- Logsig - Logsig	<b>12-15-15-1</b>	0.1954	0.1712	0.1546	0.0472	0.0435	0.0451
FFBP	1	Puerlin	12-1	0.9197	0.8821	0.7942	0.0010	0.0007	0.0031
FFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.8870	0.9065	0.9230	0.0014	0.0009	0.0007
FFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	<b>12-15-15-1</b>	0.8947	0.9121	0.8579	0.0013	0.0009	0.0011
CFBP	2	Tansig- Tansig	12-15-1	0.9720	0.9637	0.8812	0.0003	0.0004	0.0018
CFBP	3	Tansig- Tansig- Tansig	<b>12-15-15-1</b>	0.9445	0.9623	0.9621	0.0006	0.0004	0.0005
CFBP	2	Logsig- Logsig	12-15-1	-0.0894	-0.0898	-0.0935	0.0464	0.0454	0.0471
CFBP	3	Logsig- Logsig - Logsig	<b>12-15-15-1</b>	0.4313	0.4819	0.4557	0.0458	0.0473	0.0473
CFBP	2	Puerlin - Puerlin	12-15-1	0.9096	0.8835	0.8367	0.0011	0.0009	0.0024
CFBP	3	Puerlin - Puerlin - Puerlin	<b>12-15-15-1</b>	0.8735	0.9088	0.9608	0.0015	0.0010	0.0005

ตารางที่ 4.8 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน

	R	R-square	MSE	MAE
Train	0.9728	0.9464	0.0003	0.0112
Validate	0.9676	0.9364	0.0004	0.0113
Test	0.9526	0.9076	0.0004	0.0128

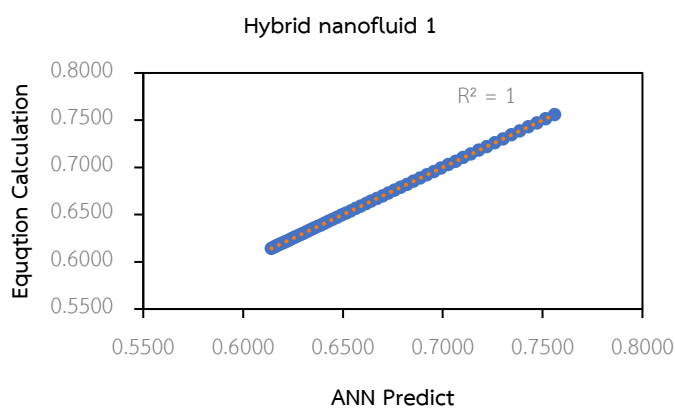
จากการทดลองหาโครงข่ายที่เหมาะสมสำหรับความหนาแน่นของของไหลไฮบริดนาโน จะได้ผลของโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่า R สูงที่สุด และค่า MSE ต่ำที่สุด แสดงในตารางที่ 4.8 เลือกโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ค่า R เท่ากับ 0.9728 0.9676 และ 0.9526 และค่า MSE เท่ากับ 0.0003 0.0004 และ 0.0004 ค่า MAE เท่ากับ 0.0112 0.0113 และ 0.0128 จากการ Train Validate และ Test ตามลำดับ และสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6



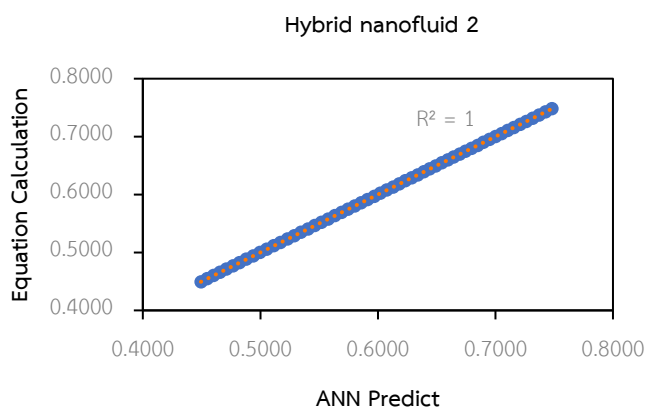
รูปที่ 4.8 กราฟค่า  $R^2$  ของกระบวนการ (a) train (b) validate และ (c) test ของความหนาแน่น

### 4.3 ผลการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์สมบัติทางความร้อนของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen plus

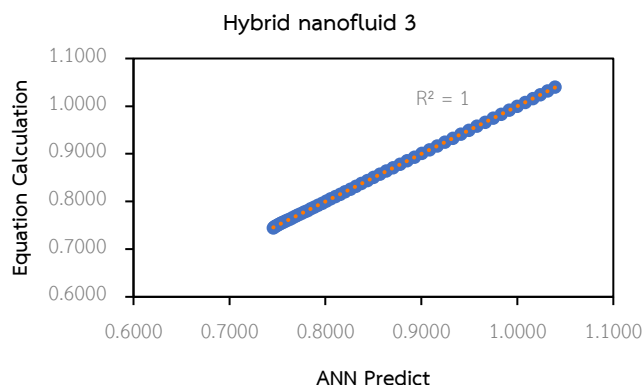
หลังจากใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) และ (CuO+MgO) ในช่วงอุณหภูมิ 293.15-348.15 K ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้งานสำหรับตัวกลางถ่ายโอนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] และนำค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนทั้ง 3 ชนิดหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมบัติทางความร้อน A-E โดยโปรแกรม Microsoft excel เมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมและการนำความร้อนที่ได้จากสมการสมบัติทางความร้อน A-E แสดงดังรูปที่ 4.9 รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.9 กราฟวิเคราะห์ค่า  $R^2$  ค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากสมการของของไหลไฮบริดนาโนที่ 1 (MWCNT+ CuO)



รูปที่ 4.10 กราฟวิเคราะห์ค่า  $R^2$  ค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากสมการของของไหลไฮบริดนาโนที่ 2 (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)

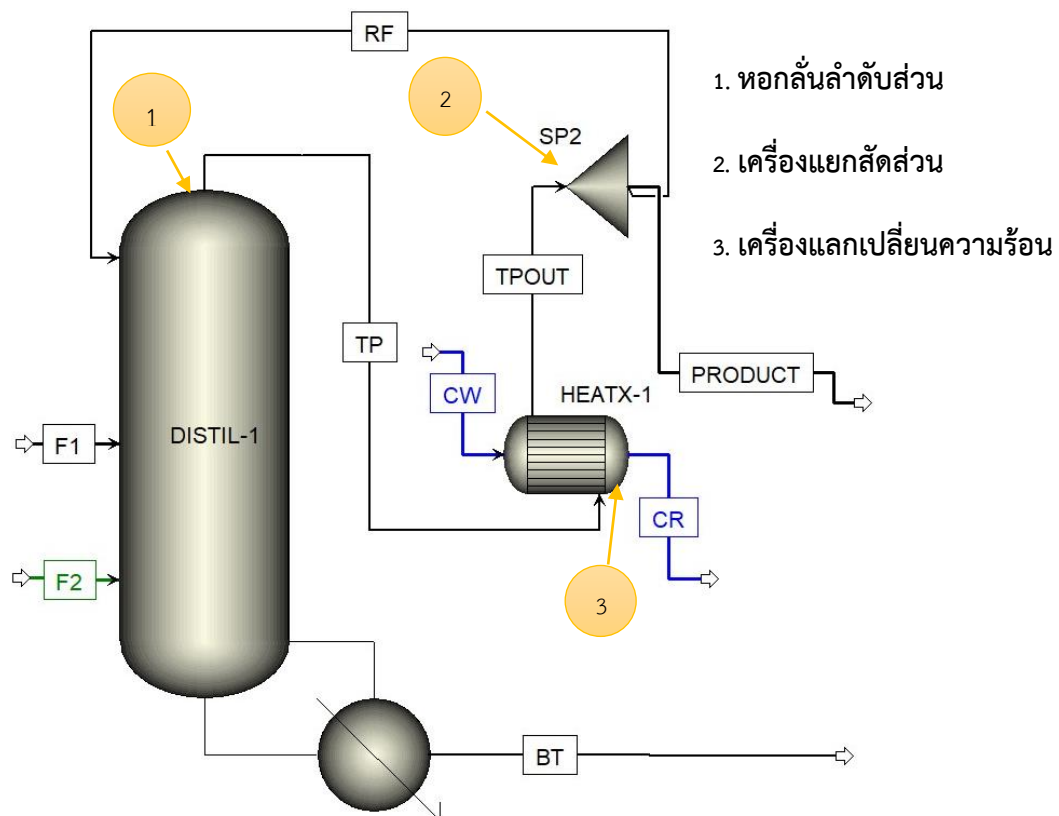


รูปที่ 4.11 กราฟวิเคราะห์ค่า  $R^2$  ค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากสมการของ  
ของไหลไฮบริดนาโนที่ 3 (CuO+ MgO)

จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนที่ได้จาก  
โครงข่ายประสาทเทียมและการนำความร้อนที่ได้จากสมการสมบัติทางความร้อน A-E ของของไหล  
ไฮบริดนาโนทั้ง 3 ชนิดพบว่า จะได้ค่า  $R^2$  เท่า 1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนที่  
ได้จากการทำนายและค่าการนำความร้อนที่ได้จากสมการสมบัติทางความร้อน A-E มีความสัมพันธ์  
โดยตรง จึงสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ A-E ไปใช้ในสมการสมบัติทางความร้อนในโปรแกรม Aspen  
Plus ได้

#### 4.4 ผลการประยุกต์ใช้การถ่ายโอนความร้อนในโปรแกรม Aspen plus

ในกรณีศึกษากระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] นั้นมีอุปกรณ์และค่าควบคุมหลายตัว เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ จำเป็นต้องกำหนดอุปกรณ์และหาค่าควบคุมที่ทำให้ได้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ตามกรณีศึกษา โดยใช้ค่าการนำความร้อนของไฮบริดนาโนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม ในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ แผนภาพการไหลถูกจำลองด้วยโปรแกรม Aspen plus V11.0 แสดงในรูป 4.7 ประกอบด้วย หอกกลั่นลำดับส่วน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแยกสกัดส่วน โดยค่าควบคุมที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ตามตารางที่ 4.9 4.10 และ 4.11 และจะได้ค่าควบคุมสำหรับกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์ที่ 99.948% ดังตารางที่ 4.12 ซึ่งใกล้เคียงกับผลงานของ Chua และคณะ [4] ที่ได้ความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 99.99 % ต่างกัน 0.05%



รูปที่ 4.12 กระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

ตารางที่ 4.9 ค่าควบคุมของสายป้อน และผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิต IPA

Stream Parameter	F1	F2	BT	Product	Unit
Temperature	98.8	190.0	81.7	144.5	°C
Pressure	2.0	1.0	1.0	1.2	bar
Mole flowrate	778.10	673.00	372.74	1078.40	kmol/hr
Mole fraction IPA	0.4790	0.0000	0.9990	0.0000	mole
Mole fraction water	0.5205	0.0010	0.0008	0.3759	mole
Mole fraction DIPA	0.0005	0.0000	0.0001	0.0000	mole
Mole fraction DMSO	0.0000	0.9990	0.0001	0.6241	mole

ตารางที่ 4.10 ค่าควบคุมของหอกลั่นลำดับส่วน (DISTIL-1) ของกระบวนการผลิต IPA

Configuration		
Calculation type	Equilibrium	
Number of stages	25-40	
Condenser	None	
Reboiler	Kettle	
Valid phases	Vapor-liquid	
Convergence	standard	
Operating specification		
Bottom rate	Mole	0.285
Feed streams		
Name	Stage	Convention
RF	1	Above-Stage
F1	20	Above-Stage
F2	6	Above-Stage

ตารางที่ 4.11 ค่าควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HEATX-1) ของกระบวนการผลิต IPA

Specification	
Model fidelity	Shortcut
Hot fluid	Tube
shortcut direction	Counter current
Calculation mode	Simulation
Exchanger specification	
Exchanger area	507 sqm
Constant UA	-
Minimum temperature approach	1 °C
Utility	U1

ตารางที่ 4.12 ค่าควบคุมเครื่องแยก (SP2) ของกระบวนการผลิต IPA

Flow split specification for outlet streams		
Stream	Specification Basis	Value
RF	Split fraction	0.7

ตารางที่ 4.13 ค่ามาตรฐานสำหรับกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่ 99.948%

No	Parameter	Value	Unit
1	Reflux ratio to column (RF)	0.70	kmol/sec
2	Bottom rate (BT)	0.285	kmol/sec
3	Temperature Feed2 (F2)	171	°C
4	Pressure Feed2 (F2)	1.10	bar
5	Mole flowrate Feed2 (F2)	0.168	kmol/sec
6	Temperature In (CW)	25	°C
7	Pressure In (CW)	5.0	bar
8	Mass Flow In (CW)	88.0	kg/sce
9	Area Heat exchanger (HEATX-1)	507	sqm



#### 4.5 ผลการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Design expert

##### 4.5.1. ผลการวิเคราะห์ (Analysis) ทางสถิติ

ผลของตัวแปรที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากการใช้ของไหลไฮบริดนาโนที่แตกต่างกันได้ผลการทดลองดังนี้

จากตารางที่ 4.14 พบว่าตัวแปรต้นที่มีค่า p-value < 0.0001 ได้แก่ B-Bottom rate และ E-Flowrate feed 2 และ Interaction BE จึงนำทั้ง 3 ตัวแปรไปวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization)

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลพื้นฐาน ต่อความบริสุทธิ์ IPA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.18E+00	4.50E+01	2.63E-02	1.07E+03	< 0.0001	significant
A-Reflux	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.55E+00	2.14E-01	
B-Bottom rate	3.98E-01	1.00E+00	3.98E-01	1.62E+04	< 0.0001	significant
C-Temperature feed 2	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.04E-01	3.42E-01	
D-Pressure feed 2	0.00E+00	1.00E+00	< 0.0001	9.59E-01	3.28E-01	
E- Flow rate feed 2	3.91E-01	1.00E+00	3.91E-01	1.60E+04	< 0.0001	significant
F-Temperature cooling	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	7.51E-01	3.87E-01	
G-Pressure cooling	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.43E-01	3.32E-01	
H-Mass flow cooling	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.04E+00	3.10E-01	
J-Area heat exchanger	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	8.34E-01	3.62E-01	
AB	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.55E-01	3.29E-01	
AC	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.15E+00	2.85E-01	
AD	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.43E-01	3.32E-01	
AE	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	7.73E-01	3.80E-01	
AF	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.10E+00	2.94E-01	
AG	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.58E-01	3.28E-01	
AH	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	8.93E-01	3.45E-01	
AJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.03E+00	3.10E-01	
BC	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.01E+00	3.16E-01	
BD	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.58E-01	3.28E-01	
BE	3.91E-01	1.00E+00	3.91E-01	1.60E+04	< 0.0001	
BF	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	8.67E-01	3.52E-01	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
BG	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.43E-01	3.32E-01	
BH	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.81E-01	3.22E-01	
BJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.08E-01	3.41E-01	
CD	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.06E+00	3.05E-01	
CE	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.04E+00	3.09E-01	
CF	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.01E+00	3.15E-01	
CG	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.04E+00	3.08E-01	
CH	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.05E+00	3.05E-01	
CJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.04E+00	3.09E-01	
DE	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.04E+00	3.08E-01	
DF	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.58E-01	3.28E-01	
DG	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.58E-01	3.28E-01	
DH	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.59E-01	3.28E-01	
DJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.42E-01	3.32E-01	
EF	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.19E+00	2.77E-01	
EG	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.06E+00	3.04E-01	
EH	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.00E+00	3.17E-01	
EJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	1.12E+00	2.90E-01	
FG	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.43E-01	3.32E-01	
FH	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.59E-01	3.28E-01	
FJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.36E-01	3.34E-01	
GH	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.43E-01	3.32E-01	
GJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.57E-01	3.28E-01	
HJ	< 0.0001	1.00E+00	< 0.0001	9.71E-01	3.25E-01	
<b>Residual</b>	1.14E-02	4.66E+02	< 0.0001			
Lack of Fit	1.14E-02	4.65E+02	< 0.0001			
Pure Error	0.00E+00	1.00E+00	< 0.0001			
<b>Cor Total</b>	1.19E+00	5.11E+02				

จากตารางที่ 4.15 พบว่าตัวแปรที่มีค่า p-value <0.0001 ได้แก่ A-Reflux B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 F-Temperature cooling H-Mass flow cooling J-Area และ Interaction AB Interaction AE Interaction AF Interaction AH Interaction AJ Interaction BE Interaction BF Interaction BH Interaction BJ Interaction EF Interaction EH และ Interaction EJ แต่เมื่อดูค่า F-value พบว่า A-Reflux และ B-Bottom rate มีค่าสูงกว่า E-Flow rate feed 2 และ F-Temperature cooling ดังนั้นจึงเลือกแค่ 2 ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือ ตัวแปร A-Reflux และ B-Bottom rate ไปวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization) ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต่อ ปริมาณ ความร้อน (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	8.12E+08	45	1.80E+07	582.49	< 0.0001	significant
A-Reflux	1.55E+08	1	1.55E+08	4995.16	< 0.0001	
B-Bottom rate	2.07E+08	1	2.07E+08	6681.05	< 0.0001	
C-Temperature feed 2	4782.04	1	4782.04	0.1544	0.6946	
D-Pressure feed 2	4354.75	1	4354.75	0.1406	0.7079	
E-Flow rate feed 2	7.31E+07	1	7.31E+07	2360.96	< 0.0001	
F-Temperature cooling	8.99E+07	1	8.99E+07	2900.6	< 0.0001	
G-Pressure cooling	2695.85	1	2695.85	0.087	0.7681	
H-Mass flow cooling	1.69E+07	1	1.69E+07	544.24	< 0.0001	
J-Area heat exchanger	3.19E+07	1	3.19E+07	1030.62	< 0.0001	
AB	1.00E+08	1	1.00E+08	3236.96	< 0.0001	
AC	6854.08	1	6854.08	0.2212	0.6383	
AD	2568.9	1	2568.9	0.0829	0.7735	
AE	2.25E+07	1	2.25E+07	727	< 0.0001	
AF	4.68E+06	1	4.68E+06	150.99	< 0.0001	
AG	4228.35	1	4228.35	0.1365	0.712	
AH	1.24E+06	1	1.24E+06	39.89	< 0.0001	
AJ	2.49E+06	1	2.49E+06	80.23	< 0.0001	
BC	4655.15	1	4655.15	0.1503	0.6985	
BD	4345.93	1	4345.93	0.1403	0.7082	
BE	8.63E+07	1	8.63E+07	2785.35	< 0.0001	
BF	8.91E+06	1	8.91E+06	287.68	< 0.0001	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
BG	2547.84	1	2547.84	0.0822	0.7744	
BH	3.04E+06	1	3.04E+06	98.15	< 0.0001	
BJ	4.30E+06	1	4.30E+06	138.64	< 0.0001	
CD	7055.24	1	7055.24	0.2277	0.6334	
CE	4285.53	1	4285.53	0.1383	0.7101	
CF	4910.11	1	4910.11	0.1585	0.6907	
CG	4810.58	1	4810.58	0.1553	0.6937	
CH	4681.33	1	4681.33	0.1511	0.6977	
CJ	6951.46	1	6951.46	0.2244	0.6359	
DE	4554.85	1	4554.85	0.147	0.7016	
DF	4223.17	1	4223.17	0.1363	0.7121	
DG	4469.63	1	4469.63	0.1443	0.7042	
DH	4283.57	1	4283.57	0.1383	0.7102	
DJ	2425.84	1	2425.84	0.0783	0.7797	
EF	2.50E+06	1	2.50E+06	80.78	< 0.0001	
EG	7166.57	1	7166.57	0.2313	0.6308	
EH	9.65E+05	1	9.65E+05	31.14	< 0.0001	
EJ	1.17E+06	1	1.17E+06	37.59	< 0.0001	
FG	2557.47	1	2557.47	0.0826	0.774	
FH	6647.15	1	6647.15	0.2146	0.6434	
FJ	44564.09	1	44564.09	1.44	0.231	
GH	2471.8	1	2471.8	0.0798	0.7777	
GJ	4192.87	1	4192.87	0.1353	0.7131	
HJ	11692.08	1	11692.08	0.3774	0.5393	
<b>Residual</b>	1.44E+07	466	30979.08			
Lack of Fit	1.44E+07	465	31045.7	33698.91	0.0043	significant
Pure Error	0.9213	1	0.9213			
<b>Cor Total</b>	8.27E+08	511				

จากตารางที่ 4.16 พบว่าตัวแปรที่มีค่า p-value <0.0001 ได้แก่ A-Reflux B-Bottom rate C-Temperature feed 2 E-Flow rate feed 2 F-Temperature cooling H-Mass flow cooling J-Area heat exchanger Interaction AC Interaction AE Interaction AF Interaction AJ Interaction BE Interaction BF Interaction CE Interaction EF Interaction EJ แต่เมื่อดูค่า F-value ที่มีค่าสูงได้แก่ B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 และ Interaction BE ดังนั้นจึงเลือกแค่ 3 ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดไปหาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization)

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต่อความบริสุทธิ์ IPA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<b>Model</b>	1.2	45	0.0267	1.38E+07	< 0.0001	significant
A-Reflux	1.70E-06	1	1.70E-06	880.96	< 0.0001	
B-Bottom rate	0.4045	1	0.4045	2.10E+08	< 0.0001	
C-Temperature feed 2	1.19E-07	1	1.19E-07	61.67	< 0.0001	
D-Pressure feed 2	5.80E-13	1	5.80E-13	0.0003	0.9862	
E-Flow rate feed 2	0.3978	1	0.3978	2.06E+08	< 0.0001	
F-Temperature cooling	2.64E-07	1	2.64E-07	137.09	< 0.0001	
G-Pressure cooling	3.92E-12	1	3.92E-12	0.002	0.964	
H-Mass flow cooling	5.47E-08	1	5.47E-08	28.39	< 0.0001	
J-Area heat exchanger	1.04E-07	1	1.04E-07	53.97	< 0.0001	
AB	5.48E-11	1	5.48E-11	0.0284	0.8662	
AC	4.22E-08	1	4.22E-08	21.88	< 0.0001	
AD	5.83E-12	1	5.83E-12	0.003	0.9562	
AE	4.85E-07	1	4.85E-07	251.59	< 0.0001	
AF	1.24E-07	1	1.24E-07	64.41	< 0.0001	
AG	1.05E-12	1	1.05E-12	0.0005	0.9814	
AH	2.77E-08	1	2.77E-08	14.36	0.0002	
AJ	5.12E-08	1	5.12E-08	26.55	< 0.0001	
BC	7.02E-09	1	7.02E-09	3.64	0.057	
BD	6.65E-13	1	6.65E-13	0.0003	0.9852	
BE	0.3978	1	0.3978	2.06E+08	< 0.0001	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
BF	3.72E-08	1	3.72E-08	19.28	< 0.0001	
BG	3.14E-12	1	3.14E-12	0.0016	0.9678	
BH	1.01E-08	1	1.01E-08	5.26	0.0223	
BJ	1.61E-08	1	1.61E-08	8.37	0.004	
CD	1.03E-11	1	1.03E-11	0.0054	0.9417	
CE	4.01E-08	1	4.01E-08	20.79	< 0.0001	
CF	5.42E-09	1	5.42E-09	2.81	0.0943	
CG	6.66E-16	1	6.66E-16	3.46E-07	0.9995	
CH	1.00E-09	1	1.00E-09	0.519	0.4716	
CJ	2.30E-09	1	2.30E-09	1.19	0.2755	
DE	1.77E-13	1	1.77E-13	0.0001	0.9923	
DF	1.61E-13	1	1.61E-13	0.0001	0.9927	
DG	2.34E-12	1	2.34E-12	0.0012	0.9722	
DH	7.16E-13	1	7.16E-13	0.0004	0.9846	
DJ	1.79E-12	1	1.79E-12	0.0009	0.9757	
EF	8.90E-08	1	8.90E-08	46.17	< 0.0001	
EG	7.91E-12	1	7.91E-12	0.0041	0.949	
EH	1.86E-08	1	1.86E-08	9.66	0.002	
EJ	3.55E-08	1	3.55E-08	18.43	< 0.0001	
FG	1.04E-11	1	1.04E-11	0.0054	0.9414	
FH	1.76E-09	1	1.76E-09	0.912	0.3401	
FJ	3.19E-09	1	3.19E-09	1.66	0.1986	
GH	3.56E-12	1	3.56E-12	0.0018	0.9657	
GJ	6.89E-13	1	6.89E-13	0.0004	0.9849	
HJ	1.09E-09	1	1.09E-09	0.5669	0.4519	
<b>Residual</b>	8.98E-07	466	1.93E-09			
Lack of Fit	8.98E-07	465	1.93E-09			
Pure Error	0	1	0			
<b>Cor Total</b>	1.2	511				

จากตารางที่ 4.17 พบว่าตัวแปรที่มีค่า p-value <0.0001 ได้แก่ A-Reflux B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 F-Temperature cooling H-Mass flow cooling J- Area heat exchanger Interaction AB Interaction AE Interaction AF Interaction AH Interaction AJ Interaction AE Interaction BE Interaction BF Interaction BH Interaction BJ Interaction EF Interaction EH และ Interaction EJ แต่เมื่อดูค่า F-value ที่มีค่าสูงได้แก่ A-Reflux และ B-Bottom rate ดังนั้นจึงเลือกแค่ 2 ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดเพื่อหาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization)

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อปริมาณความร้อน (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	8.11E+08	45	1.80E+07	685.08	< 0.0001	significant
A-Reflux	1.52E+08	1	1.52E+08	5771.33	< 0.0001	
B-Bottom rate	2.07E+08	1	2.07E+08	7858.59	< 0.0001	
C-Temperature feed 2	3.07	1	3.07	0.0001	0.9914	
D-Pressure feed 2	7.33	1	7.33	0.0003	0.9867	
E-Flow rate feed 2	7.37E+07	1	7.37E+07	2799.61	< 0.0001	
F-Temperature cooling	9.12E+07	1	9.12E+07	3465.63	< 0.0001	
G-Pressure cooling	208.23	1	208.23	0.0079	0.9292	
H-Mass flow cooling	1.64E+07	1	1.64E+07	623.66	< 0.0001	
J-Area heat exchanger	3.27E+07	1	3.27E+07	1242.01	< 0.0001	
AB	1.01E+08	1	1.01E+08	3843.32	< 0.0001	
AC	264.99	1	264.99	0.0101	0.9201	
AD	149.14	1	149.14	0.0057	0.94	
AE	2.32E+07	1	2.32E+07	881.84	< 0.0001	
AF	4.38E+06	1	4.38E+06	166.37	< 0.0001	
AG	1.03	1	1.03	0	0.995	
AH	1.39E+06	1	1.39E+06	52.79	< 0.0001	
AJ	2.26E+06	1	2.26E+06	86	< 0.0001	
BC	11.53	1	11.53	0.0004	0.9833	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
BD	0.0011	1	0.0011	4.35E-08	0.9998	
BE	8.47E+07	1	8.47E+07	3217	< 0.0001	
BF	9.27E+06	1	9.27E+06	352.08	< 0.0001	
BG	225.49	1	225.49	0.0086	0.9263	
BH	2.81E+06	1	2.81E+06	106.78	< 0.0001	
BJ	4.55E+06	1	4.55E+06	173.02	< 0.0001	
CD	252.73	1	252.73	0.0096	0.922	
CE	0.5174	1	0.5174	0	0.9965	
CF	1.08	1	1.08	0	0.9949	
CG	4.63	1	4.63	0.0002	0.9894	
CH	1.39	1	1.39	0.0001	0.9942	
CJ	185.76	1	185.76	0.0071	0.9331	
DE	4.56	1	4.56	0.0002	0.9895	
DF	1.33	1	1.33	0.0001	0.9943	
DG	1.25	1	1.25	0	0.9945	
DH	0.0193	1	0.0193	7.34E-07	0.9993	
DJ	307.37	1	307.37	0.0117	0.914	
EF	2.72E+06	1	2.72E+06	103.34	< 0.0001	
EG	189.22	1	189.22	0.0072	0.9325	
EH	8.34E+05	1	8.34E+05	31.68	< 0.0001	
EJ	1.31E+06	1	1.31E+06	49.69	< 0.0001	
FG	367.51	1	367.51	0.014	0.906	
FH	21246.11	1	21246.11	0.8073	0.3694	
FJ	20536.07	1	20536.07	0.7803	0.3775	
GH	207.67	1	207.67	0.0079	0.9293	
GJ	0.3761	1	0.3761	0	0.997	
HJ	1748.43	1	1748.43	0.0664	0.7967	
<b>Residual</b>	1.23E+07	466	26318.83			
Lack of Fit	1.23E+07	465	26375.43	6.43E+06	0.0003	significant



Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Pure Error	0.0041	1	0.0041			
<b>Cor Total</b>	<b>8.24E+08</b>	<b>511</b>				

จากตารางที่ 4.18 พบว่าตัวแปรที่มีค่า p-value < 0.0001 ได้แก่ A-Reflux B-Bottom rate C-Temperature feed 2 E-Flow rate feed 2 F-Temperature cooling H-Mass flow cooling และ J-Area heat exchanger Interaction AC Interaction AE Interaction AF Interaction AJ Interaction BE Interaction BF Interaction CE Interaction EF และ Interaction EJ แต่เมื่อดูค่า F-value มีค่าสูงได้แก่ B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 และ Interaction BE ดังนั้น จึงเลือกแค่ 3 ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดไปวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization) ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อความบริสุทธิ์ IPA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<b>Model</b>	1.2	45	0.0267	1.38E+07	< 0.0001	significant
A-Reflux	1.70E-06	1	1.70E-06	879.03	< 0.0001	
B-Bottom rate	0.4045	1	0.4045	2.10E+08	< 0.0001	
C-Temperature feed 2	1.18E-07	1	1.18E-07	61.38	< 0.0001	
D-Pressure feed 2	1.89E-12	1	1.89E-12	0.001	0.975	
E-Flow rate feed 2	0.3978	1	0.3978	2.06E+08	< 0.0001	
F-Temperature cooling	2.63E-07	1	2.63E-07	136.56	< 0.0001	
G-Pressure cooling	6.98E-12	1	6.98E-12	0.0036	0.9521	
H-Mass flow cooling	5.44E-08	1	5.44E-08	28.22	< 0.0001	
J-Area heat exchanger	1.04E-07	1	1.04E-07	53.66	< 0.0001	
AB	6.76E-11	1	6.76E-11	0.0351	0.8516	
AC	4.25E-08	1	4.25E-08	22.03	< 0.0001	
AD	9.22E-12	1	9.22E-12	0.0048	0.9449	
AE	4.86E-07	1	4.86E-07	251.99	< 0.0001	
AF	1.25E-07	1	1.25E-07	64.68	< 0.0001	
AG	3.44E-12	1	3.44E-12	0.0018	0.9664	
AH	2.80E-08	1	2.80E-08	14.5	0.0002	
AJ	5.15E-08	1	5.15E-08	26.68	< 0.0001	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
BC	6.91E-09	1	6.91E-09	3.58	0.0591	
BD	2.23E-12	1	2.23E-12	0.0012	0.9729	
BE	0.3978	1	0.3978	2.06E+08	< 0.0001	
BF	3.68E-08	1	3.68E-08	19.1	< 0.0001	
BG	6.18E-12	1	6.18E-12	0.0032	0.9549	
BH	1.00E-08	1	1.00E-08	5.19	0.0232	
BJ	1.59E-08	1	1.59E-08	8.25	0.0043	
CD	1.49E-11	1	1.49E-11	0.0077	0.9301	
CE	4.04E-08	1	4.04E-08	20.92	< 0.0001	
CF	5.52E-09	1	5.52E-09	2.86	0.0914	
CG	4.80E-13	1	4.80E-13	0.0002	0.9874	
CH	1.04E-09	1	1.04E-09	0.5401	0.4628	
CJ	2.38E-09	1	2.38E-09	1.23	0.2677	
DE	1.40E-12	1	1.40E-12	0.0007	0.9785	
DF	1.42E-12	1	1.42E-12	0.0007	0.9783	
DG	6.59E-13	1	6.59E-13	0.0003	0.9853	
DH	2.02E-12	1	2.02E-12	0.001	0.9742	
DJ	6.63E-13	1	6.63E-13	0.0003	0.9852	
EF	8.94E-08	1	8.94E-08	46.32	< 0.0001	
EG	4.39E-12	1	4.39E-12	0.0023	0.962	
EH	1.88E-08	1	1.88E-08	9.75	0.0019	
EJ	3.59E-08	1	3.59E-08	18.59	< 0.0001	
FG	6.39E-12	1	6.39E-12	0.0033	0.9541	
FH	1.82E-09	1	1.82E-09	0.9438	0.3318	
FJ	3.29E-09	1	3.29E-09	1.7	0.1923	
GH	6.41E-12	1	6.41E-12	0.0033	0.9541	
GJ	0	1	0	0	1	
HJ	1.15E-09	1	1.15E-09	0.5934	0.4415	
<b>Residual</b>	8.99E-07	466	1.93E-09			
Lack of Fit	8.99E-07	465	1.93E-09			
Pure Error	0	1	0			
<b>Cor Total</b>	1.2	511				

จากตารางที่ 4.19 พบว่าตัวแปรที่มีค่า p-value <0.0001 ได้แก่ A-Reflux B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 F-Temperature cooling H-Mass flow cooling J-Area heat exchanger Interaction AB Interaction AE Interaction AF Interaction AH Interaction AJ Interaction BE Interaction BF Interaction BH และ Interaction BJ แต่เมื่อดูค่า F-value มีค่าสูงได้แก่ A- Reflux และ B-Bottom rate ดังนั้นจึงเลือกแค่ 2 ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดไปวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization)

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อปริมาณความร้อน (Q) ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	8.11E+08	45	1.80E+07	684.91	< 0.0001	significant
A-Reflux	1.52E+08	1	1.52E+08	5770.42	< 0.0001	
B-Bottom rate	2.07E+08	1	2.07E+08	7855.91	< 0.0001	
C-Temperature feed 2	0.4106	1	0.4106	0	0.9969	
D-Pressure feed 2	15.26	1	15.26	0.0006	0.9808	
E-Flow rate feed 2	7.37E+07	1	7.37E+07	2798.69	< 0.0001	
F-Temperature cooling	9.12E+07	1	9.12E+07	3465.07	< 0.0001	
G-Pressure cooling	235.58	1	235.58	0.0089	0.9247	
H-Mass flow cooling	1.64E+07	1	1.64E+07	623.72	< 0.0001	
J-Area heat exchanger	3.27E+07	1	3.27E+07	1241.38	< 0.0001	
AB	1.01E+08	1	1.01E+08	3842.19	< 0.0001	
AC	237.31	1	237.31	0.009	0.9244	
AD	146.97	1	146.97	0.0056	0.9405	
AE	2.32E+07	1	2.32E+07	881.54	< 0.0001	
AF	4.38E+06	1	4.38E+06	166.41	< 0.0001	
AG	1.66	1	1.66	0.0001	0.9937	
AH	1.39E+06	1	1.39E+06	52.76	< 0.0001	
AJ	2.26E+06	1	2.26E+06	85.99	< 0.0001	
BC	4.91	1	4.91	0.0002	0.9891	
BD	0.1145	1	0.1145	4.35E-06	0.9983	
BE	8.47E+07	1	8.47E+07	3216.38	< 0.0001	
BF	9.26E+06	1	9.26E+06	351.91	< 0.0001	
BG	241.25	1	241.25	0.0092	0.9238	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
BH	2.81E+06	1	2.81E+06	106.75	< 0.0001	
BJ	4.55E+06	1	4.55E+06	172.95	< 0.0001	
CD	230.89	1	230.89	0.0088	0.9254	
CE	1.33	1	1.33	0.0001	0.9943	
CF	13.57	1	13.57	0.0005	0.9819	
CG	0.8302	1	0.8302	0	0.9955	
CH	2.19	1	2.19	0.0001	0.9927	
CJ	240.03	1	240.03	0.0091	0.924	
DE	2.29	1	2.29	0.0001	0.9926	
DF	0.5355	1	0.5355	0	0.9964	
DG	0.1194	1	0.1194	4.54E-06	0.9983	
DH	0.0921	1	0.0921	3.50E-06	0.9985	
DJ	348.28	1	348.28	0.0132	0.9085	
EF	2.72E+06	1	2.72E+06	103.37	< 0.0001	
EG	169.39	1	169.39	0.0064	0.9361	
EH	8.35E+05	1	8.35E+05	31.7	< 0.0001	
EJ	1.31E+06	1	1.31E+06	49.61	< 0.0001	
FG	297.33	1	297.33	0.0113	0.9154	
FH	21804.58	1	21804.58	0.8283	0.3632	
FJ	20582.41	1	20582.41	0.7819	0.377	
GH	210.07	1	210.07	0.008	0.9289	
GJ	1.47	1	1.47	0.0001	0.994	
HJ	1628.69	1	1628.69	0.0619	0.8037	
<b>Residual</b>	1.23E+07	466	26324			
Lack of Fit	1.23E+07	465	26380.61	1.12E+05	0.0024	significant
Pure Error	0.2362	1	0.2362			
<b>Cor Total</b>	8.24E+08	511				

จากตารางที่ 4.20 พบว่าตัวแปรที่มีค่า p-value <0.0001 ได้แก่ B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 Interaction BE และ Interaction BH แต่เมื่อดูค่า F-value มีค่าสูงได้แก่ B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 และ Interaction BE ดังนั้นจึงเลือกแค่ 3 ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดไปวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization)

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.8628	45	0.0192	38.72	< 0.0001	significant
A-Reflux	0.0008	1	0.0008	1.6	0.206	
B-Bottom rate	0.2317	1	0.2317	468.02	< 0.0001	
C-Temperature feed 2	0.0008	1	0.0008	1.54	0.2157	
D-Pressure feed 2	0.0008	1	0.0008	1.67	0.1966	
E-Flow rate feed 2	0.2535	1	0.2535	512.05	< 0.0001	
F-Temperature cooling	0.0005	1	0.0005	1.04	0.3085	
G-Pressure cooling	0.0017	1	0.0017	3.33	0.0685	
H-Mass flow cooling	0.0009	1	0.0009	1.84	0.176	
J-Area heat exchanger	0.0001	1	0.0001	0.164	0.6857	
AB	5.49E-06	1	5.49E-06	0.0111	0.9162	
AC	0	1	0	0.0364	0.8488	
AD	0.0001	1	0.0001	0.2036	0.6521	
AE	0.0001	1	0.0001	0.1707	0.6797	
AF	0.0002	1	0.0002	0.4523	0.5016	
AG	0	1	0	0.0387	0.8442	
AH	0.0007	1	0.0007	1.45	0.2288	
AJ	0.0012	1	0.0012	2.48	0.1161	
BC	0.0014	1	0.0014	2.87	0.0909	
BD	4.94E-06	1	4.94E-06	0.01	0.9205	
BE	0.2937	1	0.2937	593.22	< 0.0001	
BF	0	1	0	0.0439	0.8342	
BG	0.0008	1	0.0008	1.57	0.2103	
BH	0.0144	1	0.0144	29.06	< 0.0001	
BJ	0.0009	1	0.0009	1.86	0.1738	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
CD	0.0002	1	0.0002	0.464	0.4961	
CE	0.0009	1	0.0009	1.74	0.1875	
CF	0	1	0	0.0612	0.8048	
CG	0.0001	1	0.0001	0.194	0.6598	
CH	0.0008	1	0.0008	1.6	0.2062	
CJ	0.0001	1	0.0001	0.1487	0.7	
DE	0.0002	1	0.0002	0.3517	0.5535	
DF	9.32E-07	1	9.32E-07	0.0019	0.9654	
DG	0.0001	1	0.0001	0.2207	0.6388	
DH	0.0008	1	0.0008	1.64	0.2013	
DJ	0.001	1	0.001	1.99	0.1595	
EF	0	1	0	0.0597	0.807	
EG	7.56E-08	1	7.56E-08	0.0002	0.9902	
EH	0.0086	1	0.0086	17.35	< 0.0001	
EJ	0.0006	1	0.0006	1.2	0.2739	
FG	0.0003	1	0.0003	0.627	0.4289	
FH	0.0006	1	0.0006	1.11	0.292	
FJ	0.0009	1	0.0009	1.77	0.184	
GH	0.0017	1	0.0017	3.38	0.0666	
GJ	0.001	1	0.001	2.06	0.1519	
HJ	0.0001	1	0.0001	0.1649	0.6848	
<b>Residual</b>	0.2085	421	0.0005			
Lack of Fit	0.2085	420	0.0005			
Pure Error	0	1	0			
<b>Cor Total</b>	1.07	466				

จากตารางที่ 4.20 พบว่าตัวแปรที่มีค่า p-value <0.0001 ได้แก่ A-Reflux B-Bottom rate E-Flow rate feed 2 F-Temperature cooling J-Area heat exchanger Interaction AB Interaction AE Interaction BE แต่เมื่อดูค่า F-value มีค่าสูงได้แก่ A- Reflux และ B-Bottom rate ดังนั้นเลือกแค่ 2 ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดไปวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization)

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อปริมาณความร้อน Q ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	5.56E+08	45	1.24E+07	26.28	< 0.0001	significant
A-Reflux	1.13E+08	1	1.13E+08	240.98	< 0.0001	
B-Bottom rate	1.06E+08	1	1.06E+08	224.99	< 0.0001	
C-Temperature feed 2	73528.71	1	73528.71	0.1564	0.6927	
D-Pressure feed 2	79223.24	1	79223.24	0.1685	0.6816	
E-Mole flow feed 2	6.30E+07	1	6.30E+07	133.91	< 0.0001	
F-Temperature cooling	5.38E+07	1	5.38E+07	114.37	< 0.0001	
G-Pressure cooling	13195.96	1	13195.96	0.0281	0.867	
H-Mass flow cooling	6.27E+06	1	6.27E+06	13.33	0.0003	
J-Area heat exchanger	1.27E+07	1	1.27E+07	27.1	< 0.0001	
AB	7.84E+07	1	7.84E+07	166.74	< 0.0001	
AC	2.05E+05	1	2.05E+05	0.435	0.5099	
AD	2215.38	1	2215.38	0.0047	0.9453	
AE	1.71E+07	1	1.71E+07	36.32	< 0.0001	
AF	1.79E+06	1	1.79E+06	3.81	0.0516	
AG	1.31E+06	1	1.31E+06	2.78	0.0963	
AH	63321.17	1	63321.17	0.1347	0.7138	
AJ	4.16E+06	1	4.16E+06	8.86	0.0031	
BC	58321.86	1	58321.86	0.1241	0.7248	
BD	72578.37	1	72578.37	0.1544	0.6946	
BE	6.54E+07	1	6.54E+07	139.19	< 0.0001	
BF	3.27E+06	1	3.27E+06	6.96	0.0086	
BG	1.84E+05	1	1.84E+05	0.3914	0.5319	

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
BH	2.70E+06	1	2.70E+06	5.74	0.017	
BJ	28026.55	1	28026.55	0.0596	0.8072	
CD	3.24E+05	1	3.24E+05	0.6887	0.4071	
CE	1.21E+06	1	1.21E+06	2.56	0.1101	
CF	9.20E+05	1	9.20E+05	1.96	0.1627	
CG	6703.93	1	6703.93	0.0143	0.905	
CH	1.50E+05	1	1.50E+05	0.3181	0.573	
CJ	3.42E+05	1	3.42E+05	0.7272	0.3943	
DE	2.92E+05	1	2.92E+05	0.6218	0.4308	
DF	1474.36	1	1474.36	0.0031	0.9554	
DG	14207.82	1	14207.82	0.0302	0.8621	
DH	1.59E+05	1	1.59E+05	0.3382	0.5612	
DJ	18353.39	1	18353.39	0.039	0.8435	
EF	8.86E+05	1	8.86E+05	1.89	0.1704	
EG	1.27E+05	1	1.27E+05	0.2707	0.6031	
EH	3.56E+05	1	3.56E+05	0.7582	0.3844	
EJ	5.87E+05	1	5.87E+05	1.25	0.2644	
FG	5154.71	1	5154.71	0.011	0.9167	
FH	3.82E+06	1	3.82E+06	8.12	0.0046	
FJ	1.88E+06	1	1.88E+06	4	0.0462	
GH	28998.36	1	28998.36	0.0617	0.804	
GJ	43746.44	1	43746.44	0.0931	0.7605	
HJ	2.94E+06	1	2.94E+06	6.24	0.0128	
<b>Residual</b>	1.98E+08	421	4.70E+05			
Lack of Fit	1.98E+08	420	4.71E+05	1.15E+08	< 0.0001	significant
Pure Error	0.0041	1	0.0041			
<b>Cor Total</b>	7.54E+08	466				



จากผลของ ANOVA พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของ IPA คือ B Bottom flowrate E Flow rate feed 2 และ Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโนสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Q) คือ A Reflux ratio Bottom rate และ Interaction AB

1. ค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ด้านล่าง B Bottom rate mole flow โดยจากรูปที่ 4.13 พบว่า ปัจจัย B Bottom rate mole flow มีผลในทางบวกต่อความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ซึ่งตรงกับทฤษฎี [75] เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลผลิตภัณฑ์ด้านล่าง จะส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อมีอัตราการไหลผลิตภัณฑ์ด้านล่างมากขึ้น ซึ่งเป็นส่วนของสารที่มีจุดเดือดสูงไหลออกมา ส่งผลให้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ซึ่งมีจุดเดือดต่ำมีความเข้มข้นมากขึ้น

Factor Coding: Actual

IPA

— — -95% CI Bands

X1 = B

Actual Factors

A = 0.7

C = 180

D = 1.085

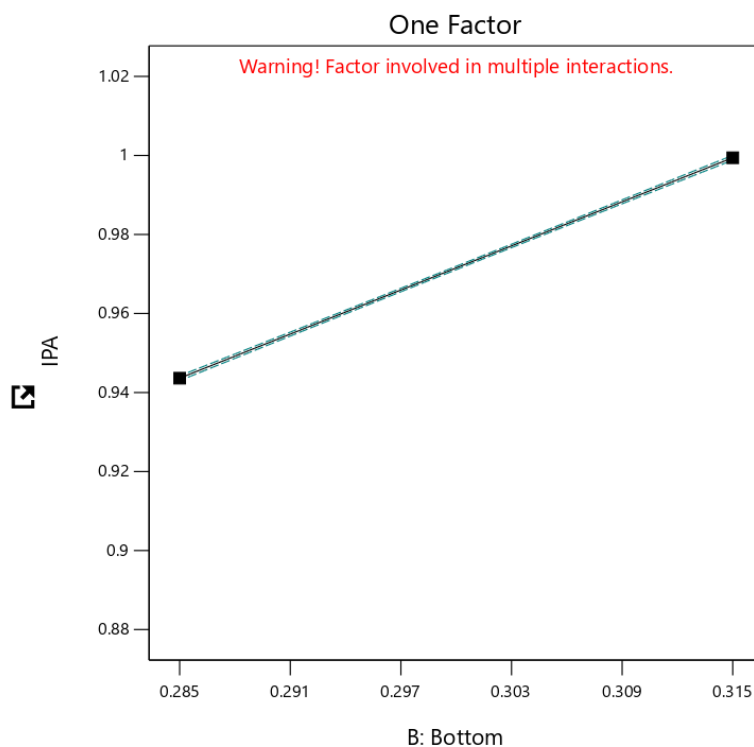
E = 0.1765

F = 25

G = 5

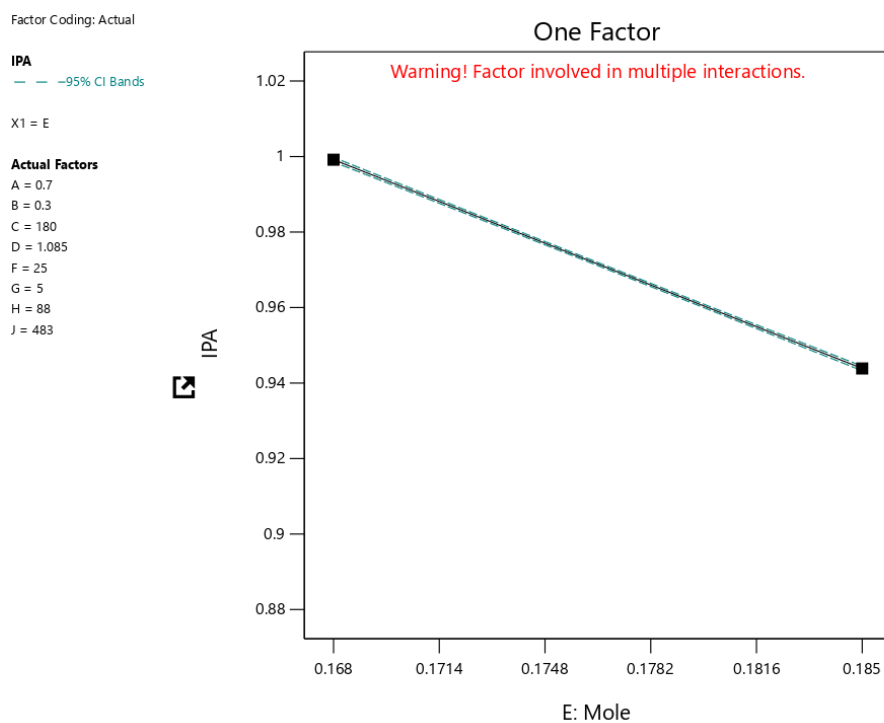
H = 88

J = 483



รูปที่ 4.13 อัตราการไหลผลิตภัณฑ์ส่วนล่างส่งผลต่อความบริสุทธิ์ IPA

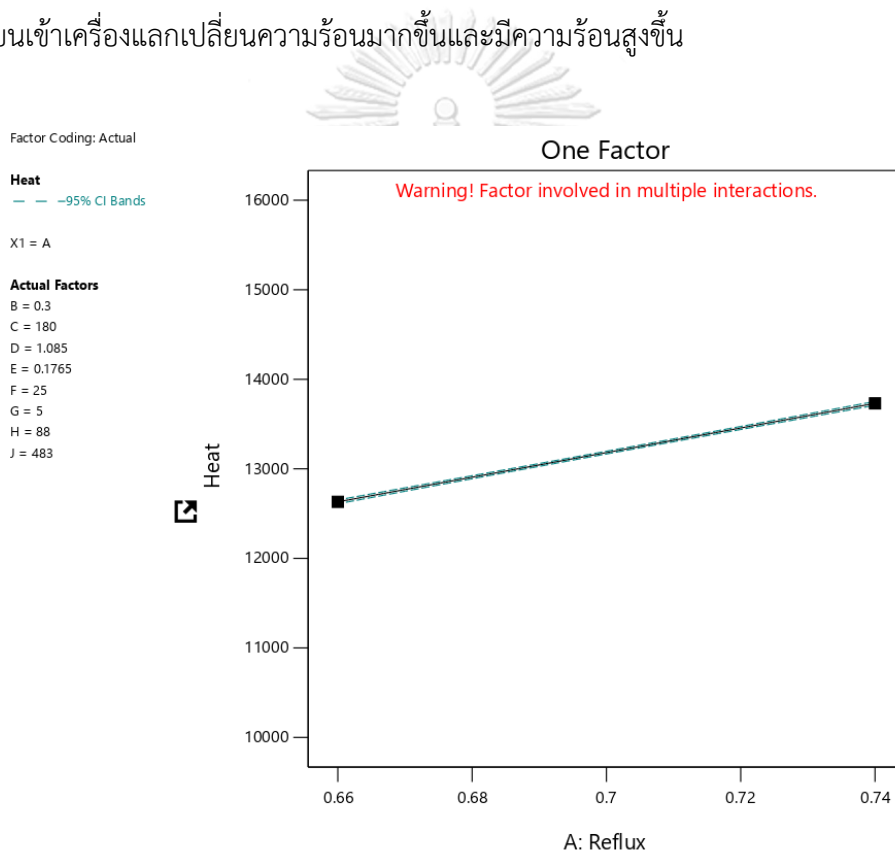
2. อัตราการไหลวัตถุดิบ 2 E Flow rate feed ดังรูปที่ 4.14 พบว่า ปัจจัย E Flow rate feed 2 มีผลในทิศทางลบต่อความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 2 เมื่อต้องการความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่มากขึ้น ต้องลดอัตราการไหลวัตถุดิบป้อนที่ 2 ไปในทิศทางที่น้อยลง เมื่อ Flow rate feed 2 เป็นสารที่มีจุดเดือดที่สูง [70] ทำให้ในหอกลั่นมีสารที่มีจุดเดือดสูงมากเกินไป ส่งผลต่อความเข้มข้นของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่ได้ลดลง โดยมีสารที่มีจุดเดือดสูงปนเปื้อนมาด้วย



รูปที่ 4.14 การไหลวัตถุดิบป้อนที่ 2 ที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ IPA

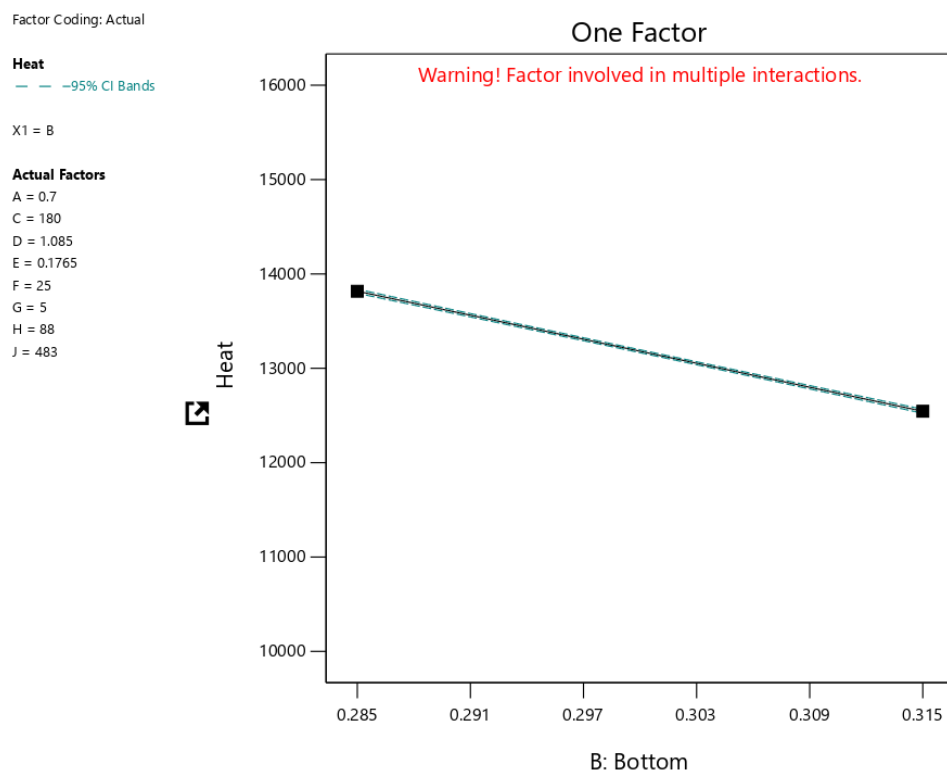
จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองในโปรแกรมออกแบบการทดลอง Design expert เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโนสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 4.10- 4.17 เมื่อดูผลของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือค่าความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดเมื่อตัวแปรหลักเปลี่ยนจะส่งผลดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการตัวแปร Reflux ratio มีผลในทิศทางบวกต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าต้องการปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงขึ้นต้องปรับค่า Reflux ratio ให้สูงขึ้น [70] ทำให้ในระบบมีความร้อนเยอะขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของสารผลิตภัณฑ์ด้านบนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้นและมีความร้อนสูงขึ้น



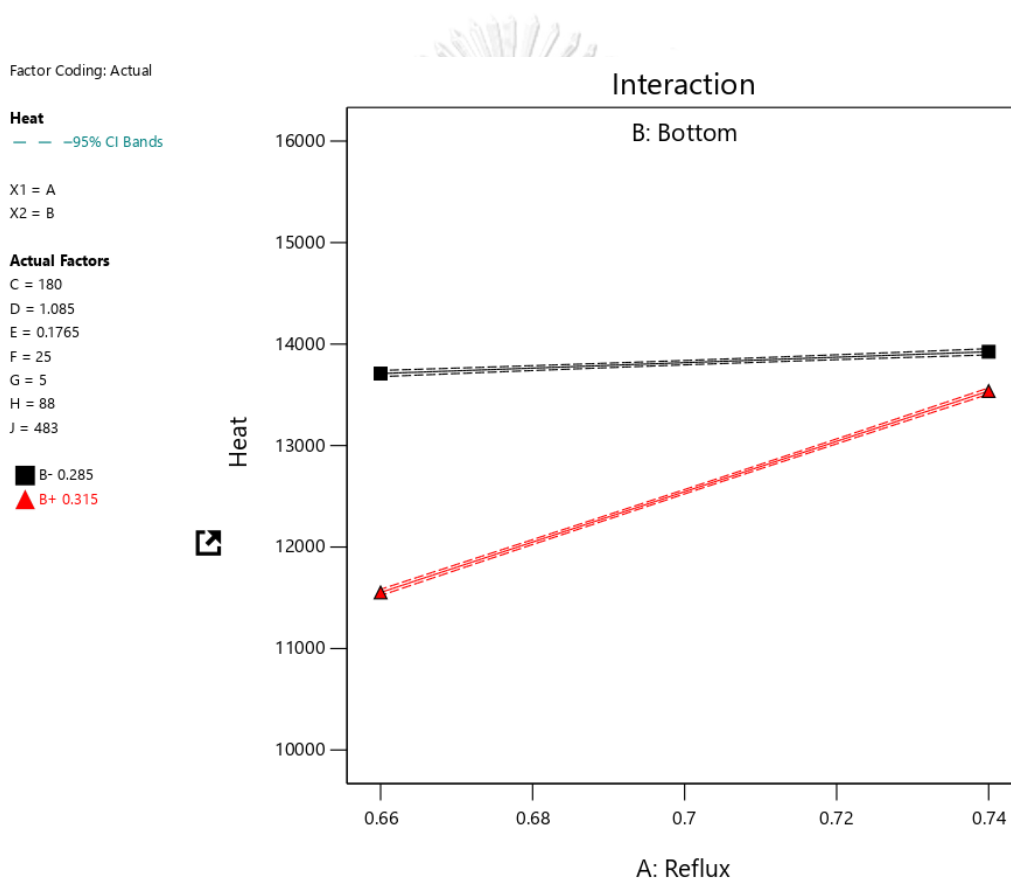
รูปที่ 4.15 Reflux ratio ที่ส่งผลต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 4.16 แสดง Bottom rate เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลทิศทางลบต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดย Bottom rate มีลดลงจะส่งผลต่อค่าความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนลดลงด้วย [70] เพราะเมื่อ Bottom rate ส่งผลต่อระดับของเหลวในหอกลั่น เมื่อ Bottom rate ลดน้อยส่งผลต่อระดับของเหลวในหอกลั่นที่สูงขึ้น ส่งผลให้สารออกด้านบนหอกลั่นเยอะขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น



รูปที่ 4.16 Bottom rate ที่ส่งผลต่อความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณา Interaction AB เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากรูป 4.17 พบว่า ปัจจัย A Reflux และปัจจัย B Bottom rate มีผลร่วมกันต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเมื่อปรับค่า ปัจจัย A Reflux Ratio ที่ค่าต่ำ และค่า B Bottom rate ที่ค่าสูง จะได้ปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ และเมื่อปรับปัจจัย A Reflux Ratio ค่าสูง และค่า B Bottom rate ค่าสูง จะส่งผลต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น แต่เมื่อปรับค่า ปัจจัย B Bottom rate ที่ค่าต่ำ ปัจจัย A Reflux Ratio ที่สูงขึ้นจะส่งผลน้อยต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4.17 Interaction AB ที่มีผลต่อปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

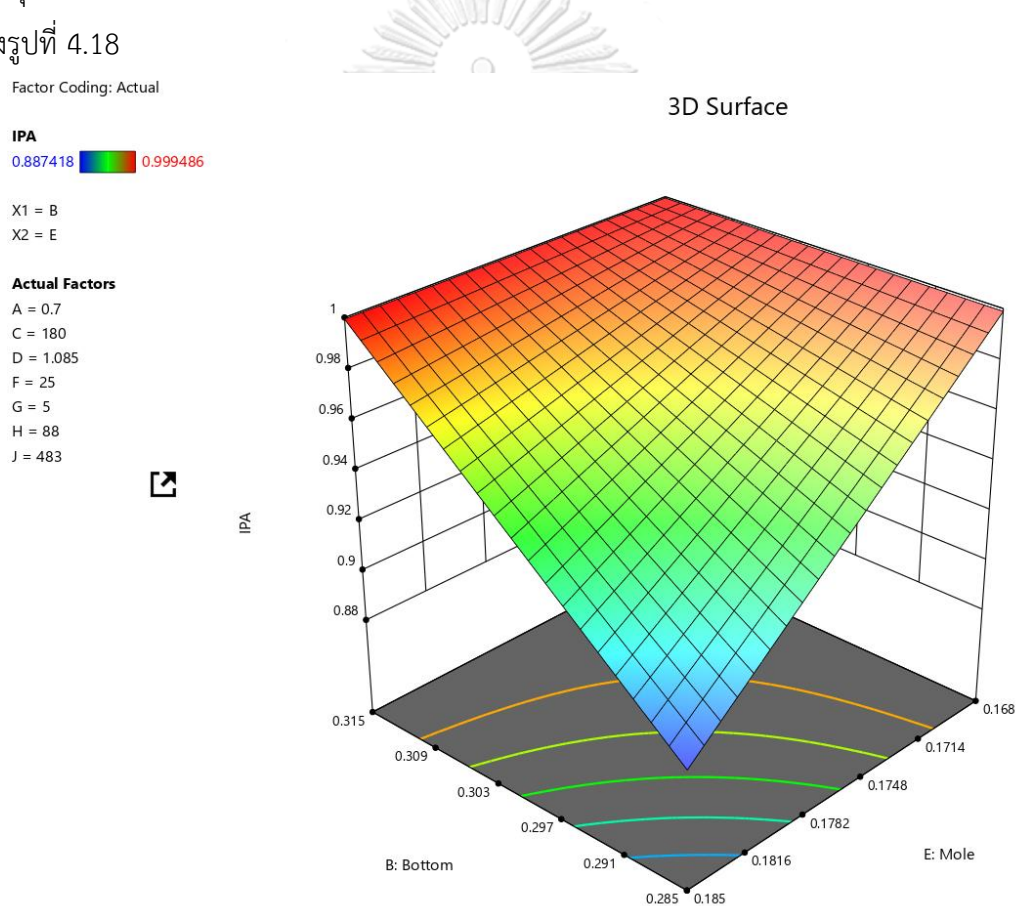
เมื่อทราบตัวแปรต้นที่มีผลต่อไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว จึงนำตัวแปรต้นที่ได้ในแต่ละแบบจำลองไปหาจุดที่ดีที่สุด (Optimization) เพื่อศึกษาค่าของตัวแปรต้นที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

#### 4.5.2. ผลการหาจุดที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (Optimization)

จากการวิเคราะห์แบบจำลองทำให้ทราบตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง จากนั้นจึงทำการศึกษาการหาจุดที่ดีที่สุด ที่แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อดังต่อไปนี้

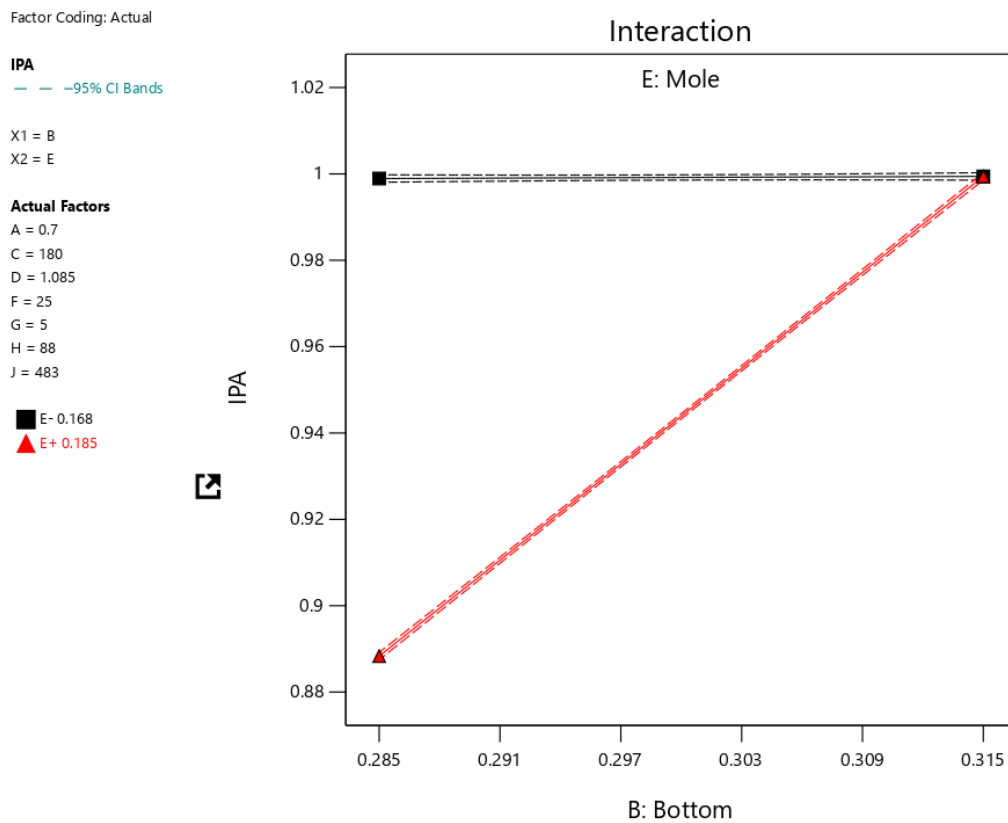
4.5.2.1. ผลการวิเคราะห์ตัวแปรต่อค่าความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ พบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value < 0.0001 นั้น คือ ค่า B -Bottom flowrate E-Flowrate feed 2 และ Interaction BE หลังจากนั้นทำการสร้างพื้นที่ผิวตอบสนอง Response surface

เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานเป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการไหลของเมื่อใช้ค่าผลิตภัณฑ์ด้านล่าง B-Bottom flow ค่ากลาง และ E-Flow rate feed 2 ค่าต่ำ จะได้ค่าความบริสุทธิ์ของ IPA 99.9486 % และสามารถปรับตัวแปรต้นเพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.18



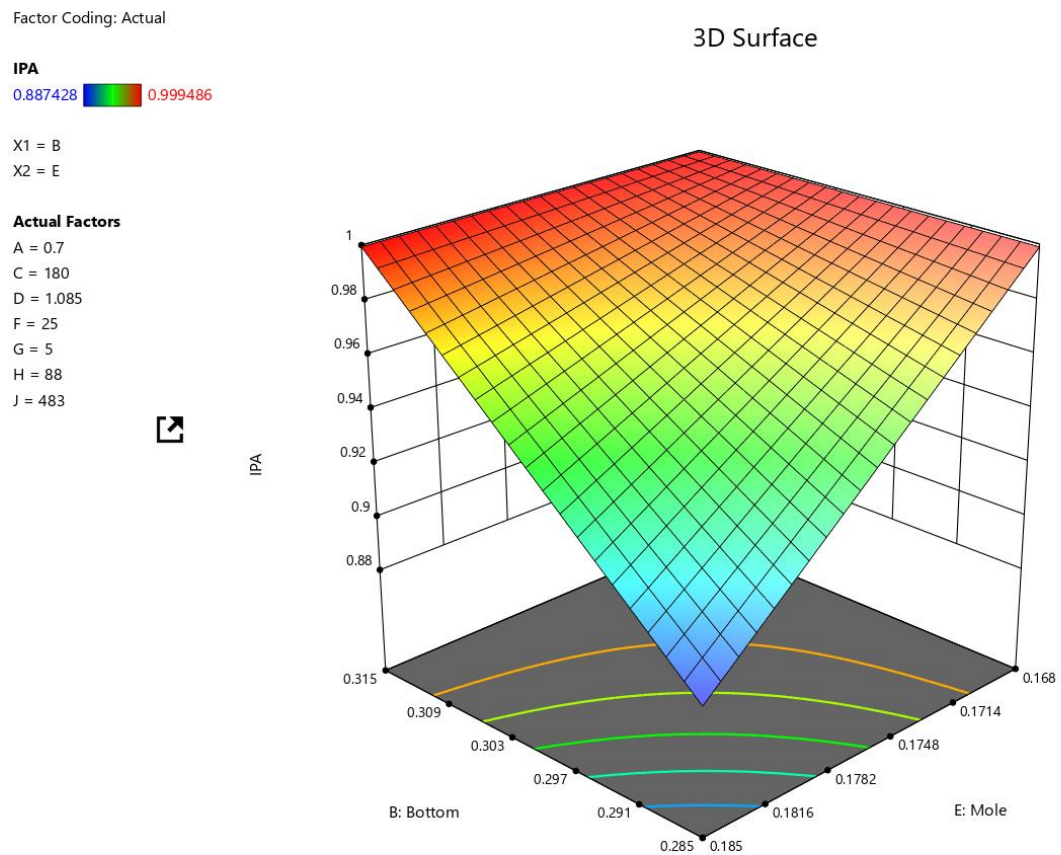
รูปที่ 4.18 ผลของตัวแปร B และ E ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณา Interaction BE สำหรับการใช้ของไหลพื้นฐานเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากรูป 4.19 พบว่า เมื่อทำการปรับค่า ปัจจัย E Feed flowrate 2 ที่ค่าต่ำ และปัจจัย B Bottom mole flow จะไม่ส่งผลต่อค่าความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกต่อไป



รูปที่ 4.19 Interaction BE ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ IPA

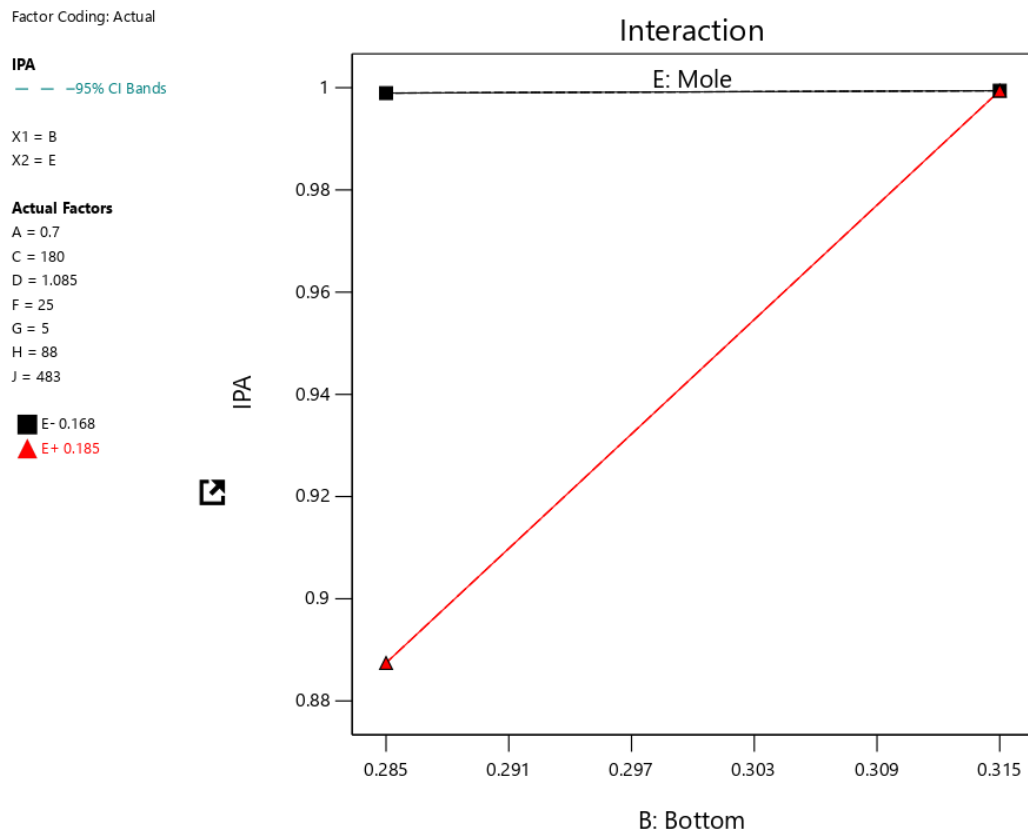
เมื่อใช้ ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) เป็นของไหลเพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อใช้ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ด้านล่าง B-Bottom flow ค่าต่ำ และ E-Flow rate feed 2 ค่าสูง จะได้ค่าตัวแปรตอบสนอง IPA 99.9486 % และสามารถ ปรับตัวแปรต้นเพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ผลของตัวแปร B และ E ต่อความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

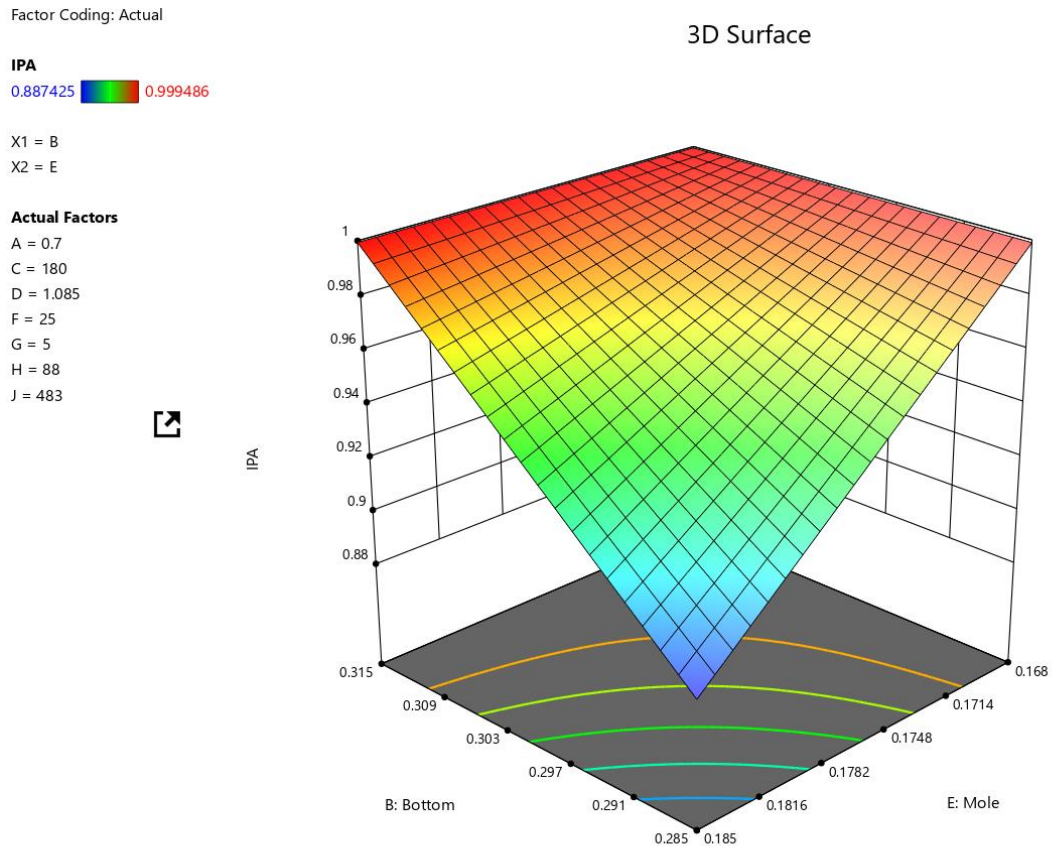


เมื่อพิจารณา Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากรูป 4.21 พบว่า พบว่า เมื่อทำการปรับค่า ปัจจัย E Feed flowrate 2 ที่ค่าต่ำ ทำให้ปัจจัย B Bottom rate mole flow จะไม่ส่งผลค่าความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกต่อไป



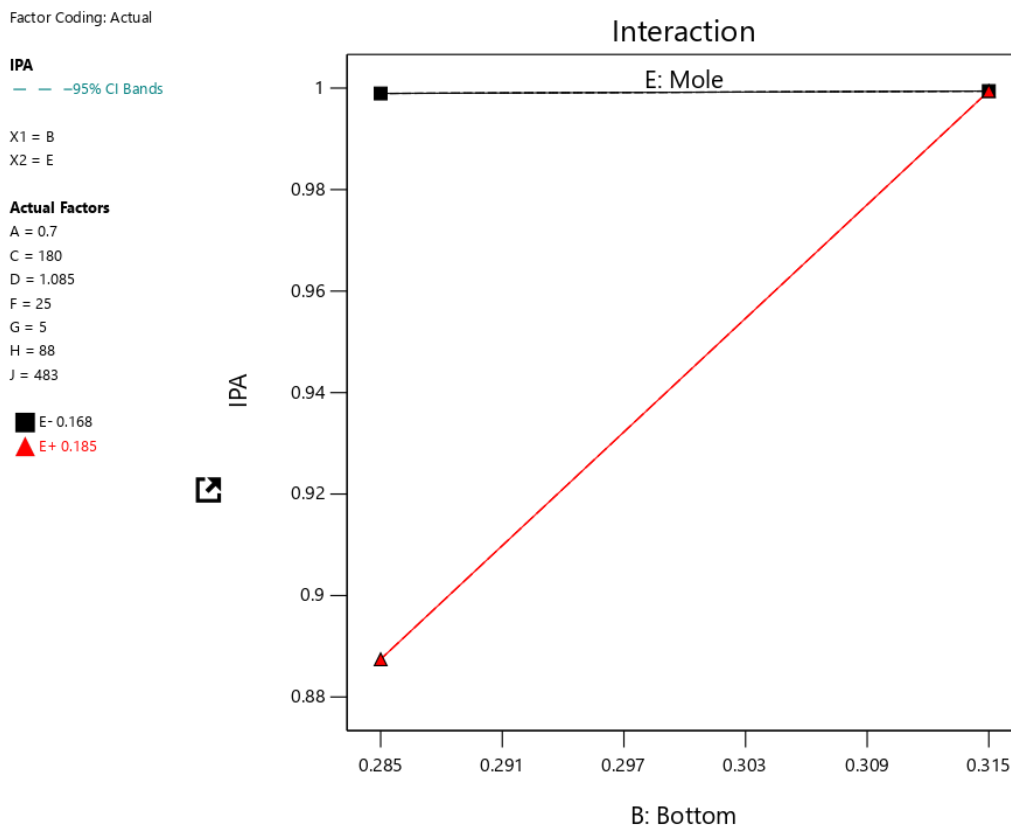
รูปที่ 4.21 Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของ IPA

เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อใช้ค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ด้านล่าง B-Bottom flow ค่าสูง และ E-Flow rate feed 2 ค่าต่ำ จะได้ตัวแปรตอบสนอง IPA 99.9486 % และสามารถปรับตัวแปรต้นเพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.22



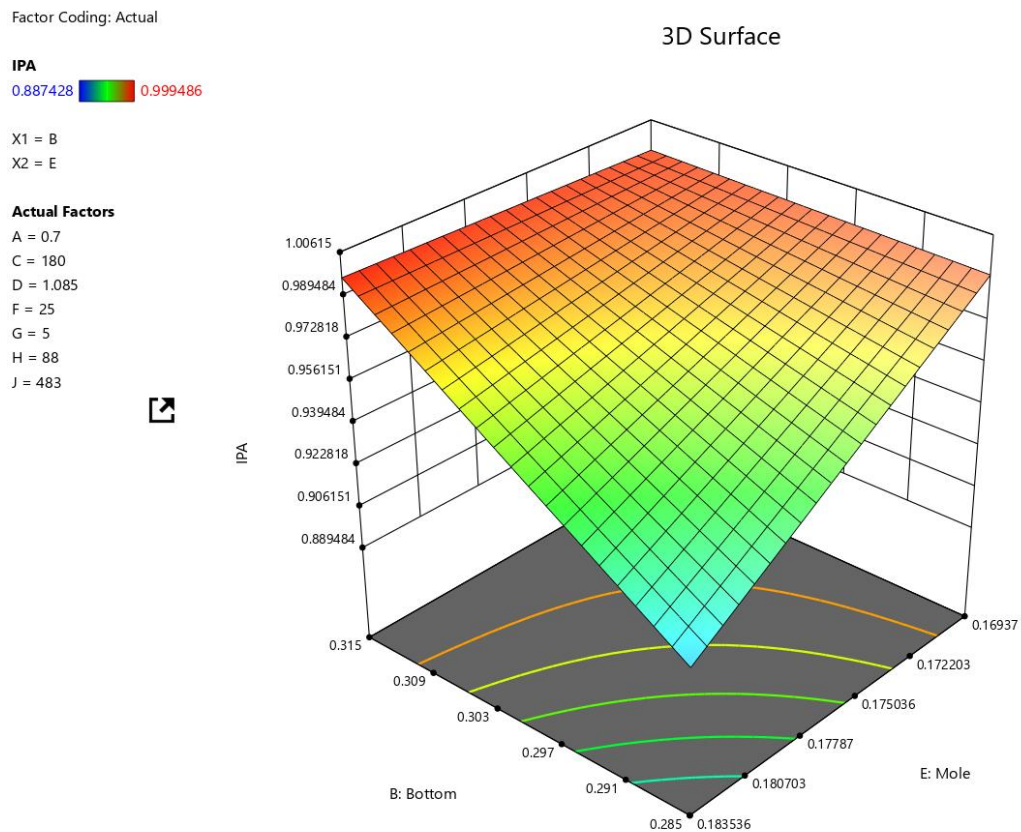
รูปที่ 4.22 ผลของตัวแปร B และ E ต่อ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

เมื่อพิจารณา Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากรูป 4.21 พบว่า พบว่า เมื่อทำการปรับค่า ปัจจัย E Feed flowrate 2 ที่ค่าต่ำ ทำให้ปัจจัย B Bottom rate mole flow จะไม่ส่งผลค่าความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกต่อไป



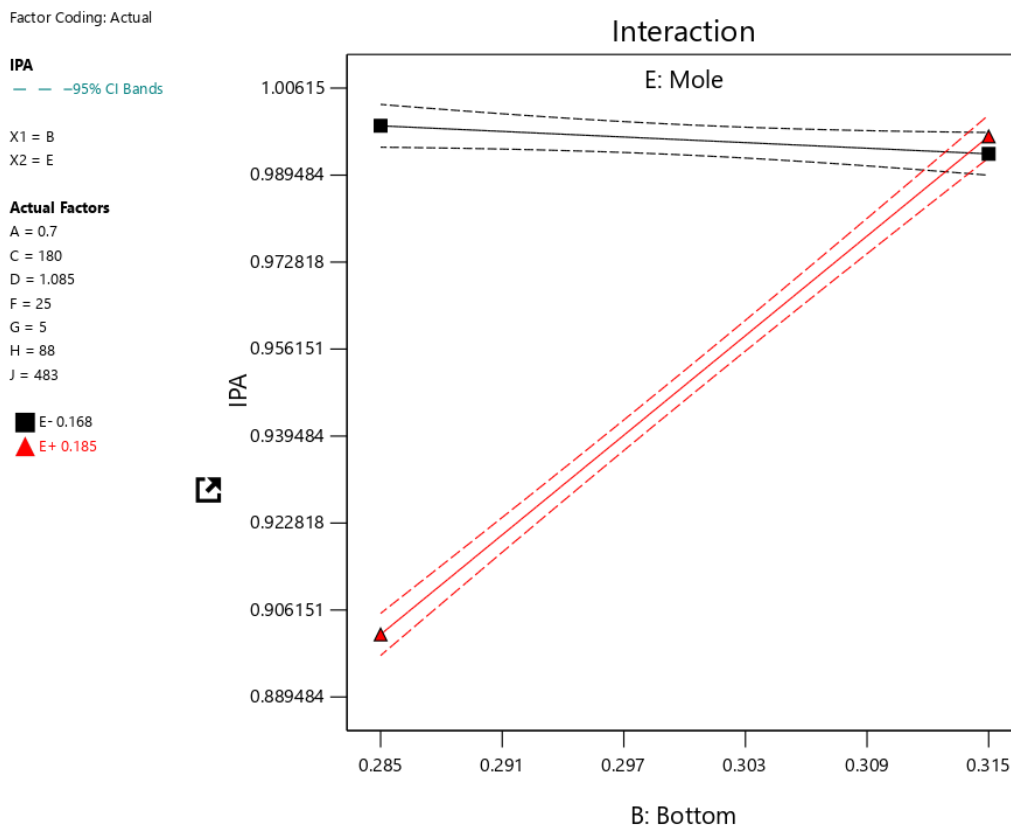
รูปที่ 4.23 Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของ IPA

เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อใช้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ด้านล่าง (Bottom flowrate) B-Bottom flow ค่าสูง และ E-Flow rate feed 2 ค่าต่ำ จะได้ตัวแปรตอบสนอง IPA 99.9486 % และสามารถปรับตัวแปรต้น เพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ผลของตัวแปร B และ E ต่อความบริสุทธิ์ของ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

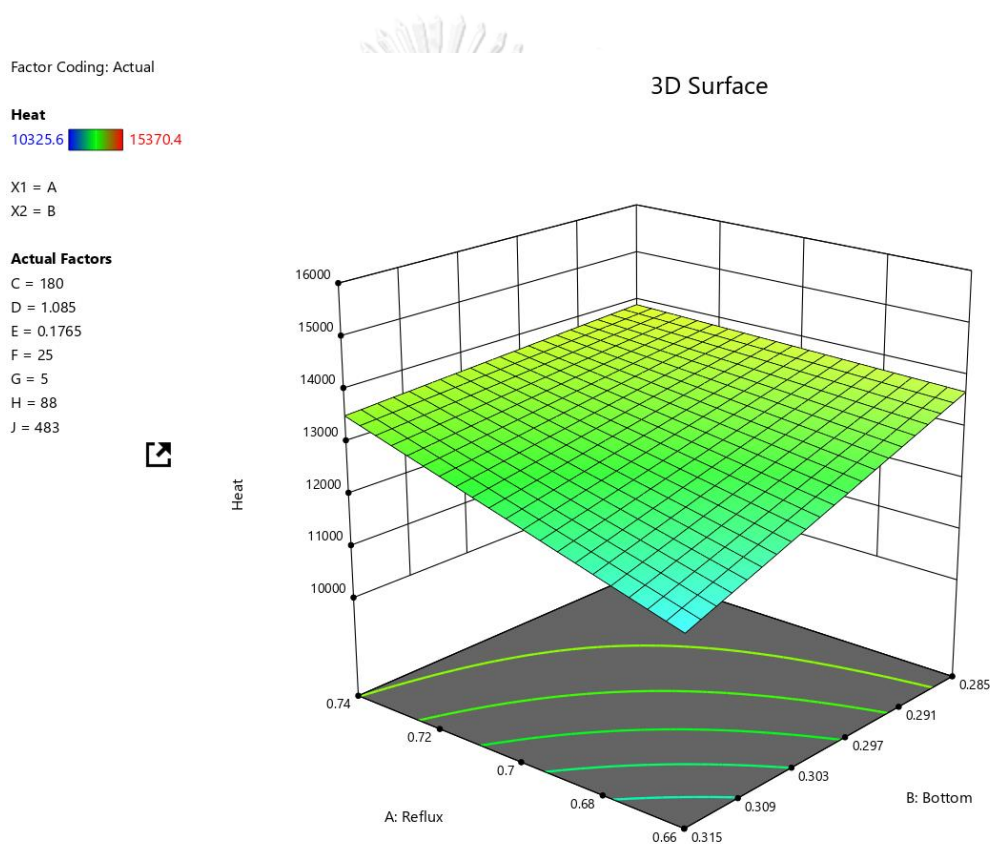
เมื่อพิจารณา Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากรูป 4.25 พบว่า พบว่า เมื่อทำการปรับค่า ปัจจัย E Feed flowrate 2 ที่ค่าต่ำ ทำให้ปัจจัย B Bottom rate mole flow จะไม่ส่งผลค่าความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกต่อไป



รูปที่ 4.25 Interaction BE เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของ IPA

2. ผลการวิเคราะห์ตัวแปรต้นต่อความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value <0.0001 นั้น และมีค่า F- value ที่สูง เมื่อมีการใช้ของไหลไฮบริดนาโนที่แตกต่างกันจะได้ตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อค่าความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากที่สุด และหาค่า LMTD (The log mean temperature difference) ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก จากโปรแกรม Aspen plus เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำความร้อน

เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานเป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องปรับตัวแปร A-Reflux ratio ค่าสูง B-Bottom flowrate ค่าต่ำ มีค่าความร้อนที่เกิดขึ้น 15346 KW ที่ความบริสุทธิ์ IPA 99.9486 % และได้ค่า LMTD 35.583 °C ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องปรับตัวแปร A-Reflux ratio ค่าสูง และ B-Bottom flowrate ค่าต่ำ ความร้อนที่เกิดขึ้น 14819 KW ที่ความบริสุทธิ์ PA 99.881 % และได้ค่า LMTD 34.1458 °C ดังรูปที่ 4.27

Factor Coding: Actual

**Q (KW)**

10325.2  15357.1

X1 = A

X2 = B

**Actual Factors**

C = 180

D = 1.085

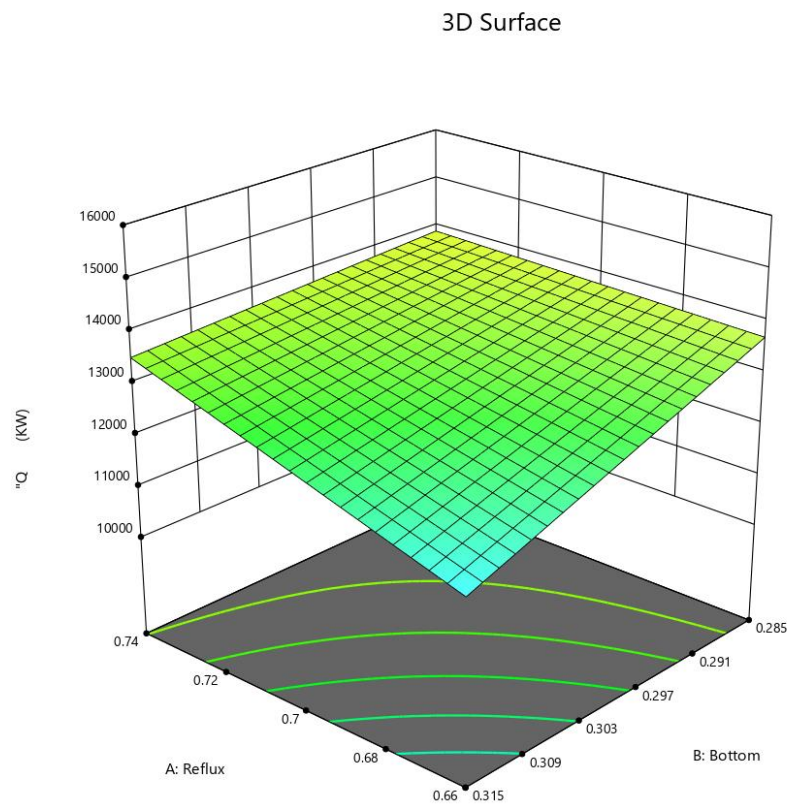
E = 0.1765

F = 25

G = 5

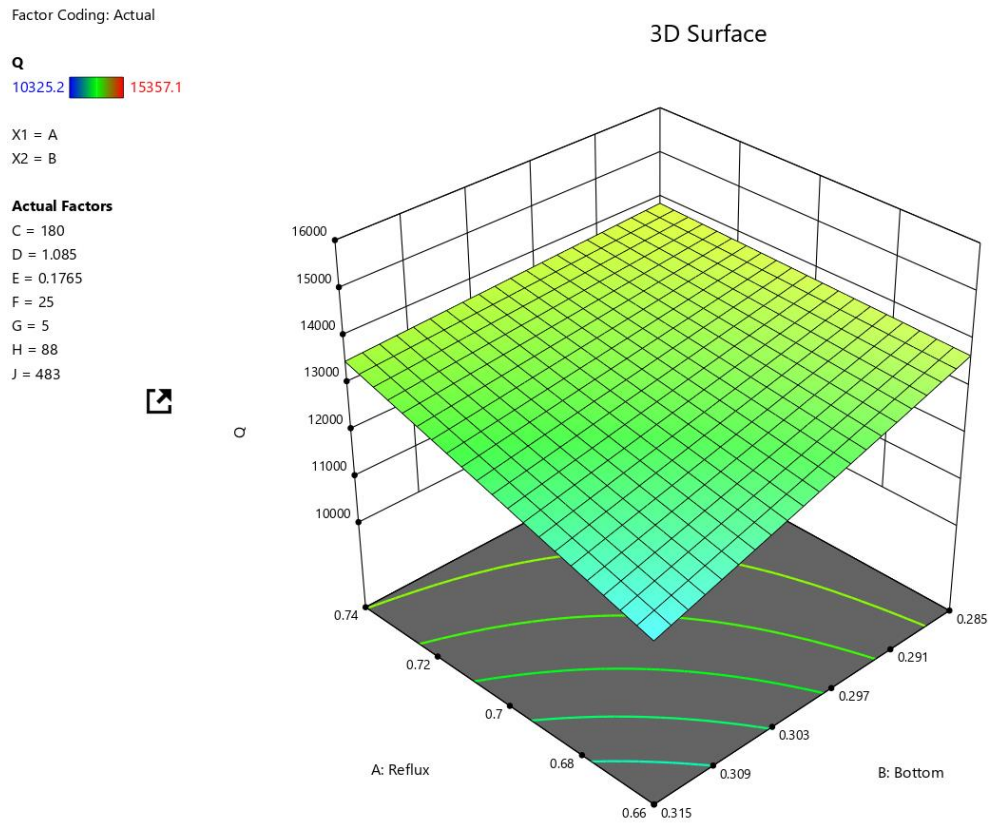
H = 88

J = 483



รูปที่ 4.27 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน(Q) ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

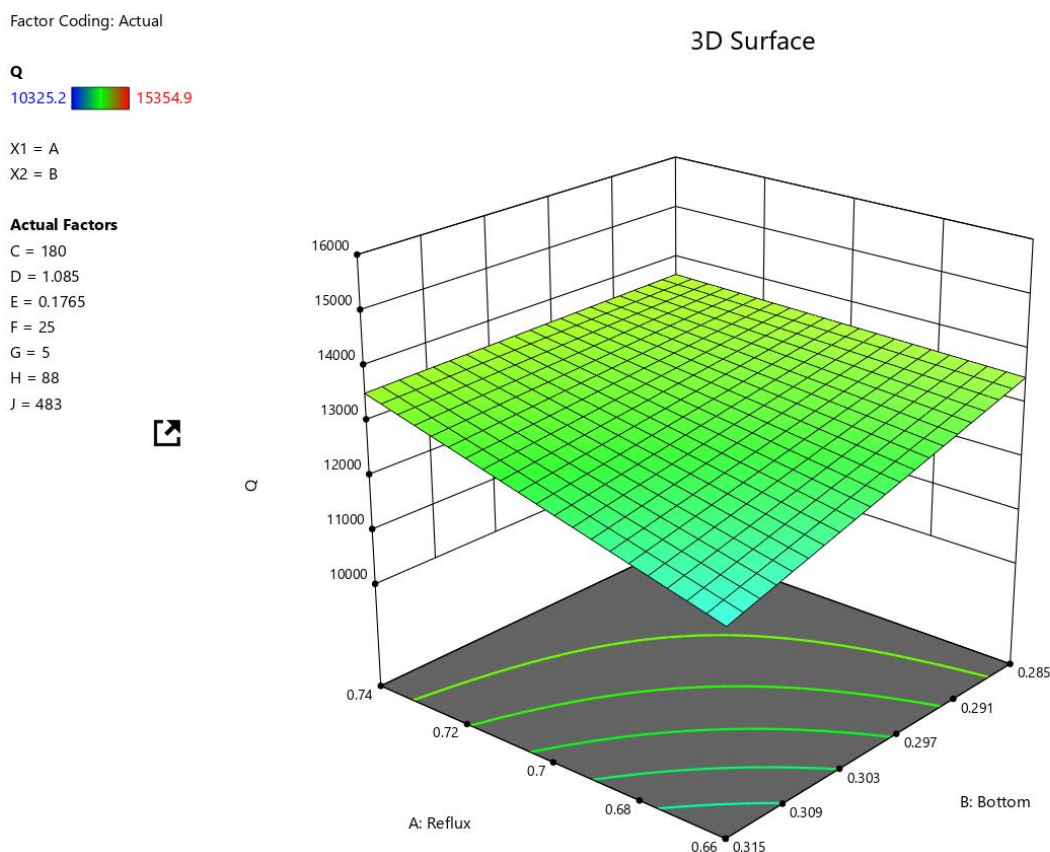
เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อปรับตัวแปร A-Reflux ratio ค่าสูง และ B-Bottom flowrate ค่าต่ำ ความร้อนที่เกิดขึ้น 14828 KW ที่ความบริสุทธิ์ IPA 99.881 % และได้ค่า LMTD 34.1448 °C ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน A-Reflux ratio ค่าสูง B-Bottom flowrate ค่าต่ำ มีค่าความร้อนที่เกิดขึ้น 14784 KW ที่ความบริสุทธิ์ IPA 99.957 และได้ค่า LMTD 33.9703 °C ดังรูปที่ 4.29

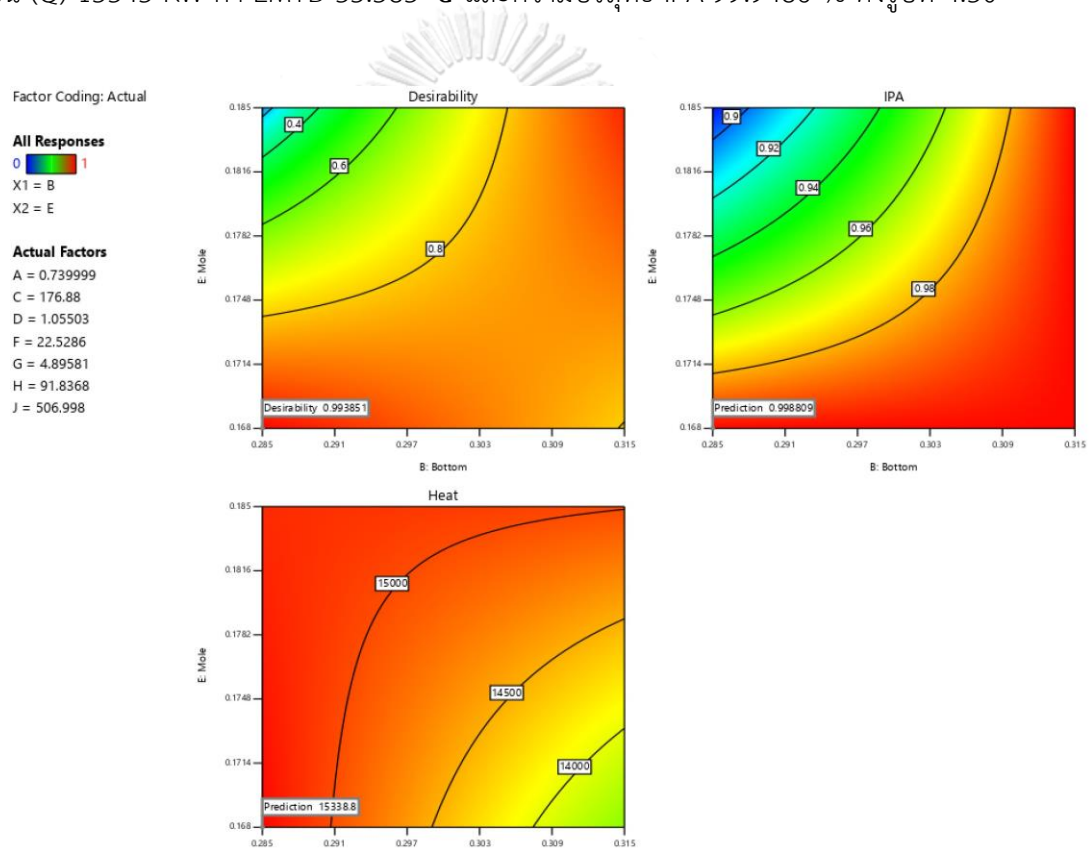


รูปที่ 4.29 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากการทดลองที่ต้องการดูประสิทธิภาพการนำความร้อนของของไหลพื้นฐานและของไหลไฮบริดนาโน พบว่าของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) มีค่า LMTD น้อยกว่าของไหลพื้นฐาน และเมื่อเปรียบเทียบของไหลไฮบริดนาโน พบว่าของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) มีค่า LMTD น้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO} + \text{MgO}$ ) มีค่าการนำความร้อนที่มากที่สุด เรียงตามลำดับไปจนถึงของไหลพื้นฐาน

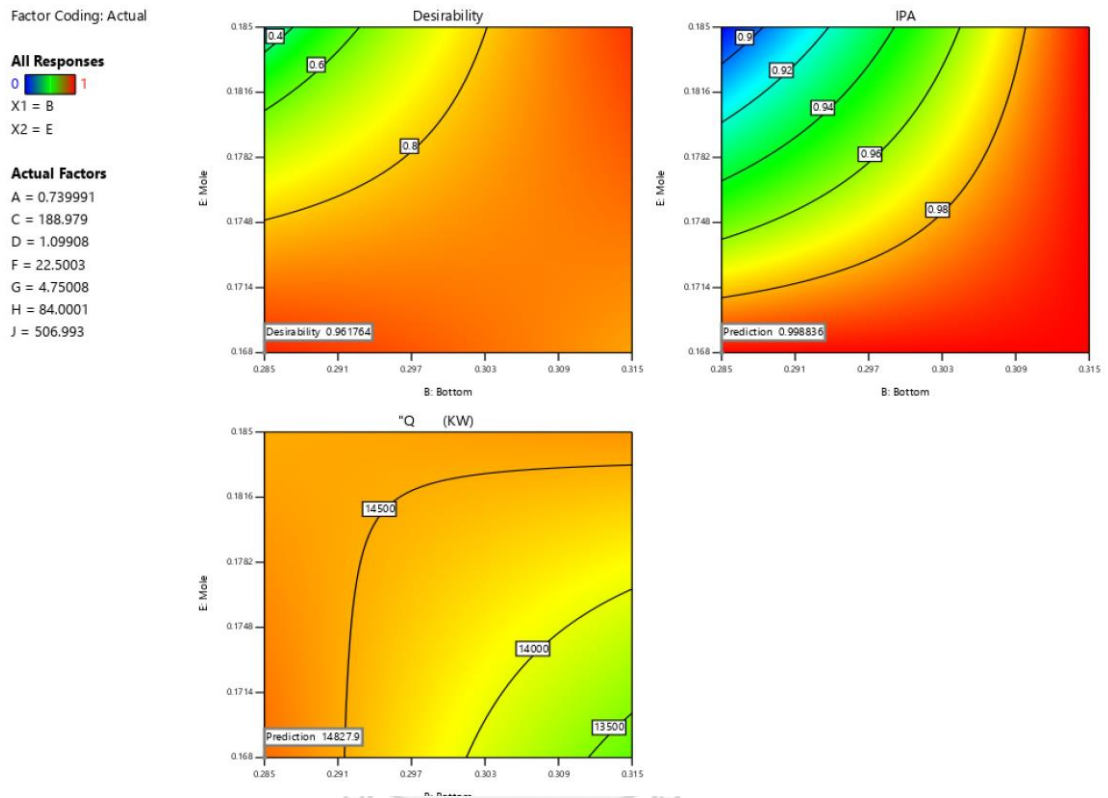
3. ผลการวิเคราะห์ตัวแปรที่ค่าพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยตัวแปรตอบสนอง ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และค่าความร้อน เมื่อต้องการความเข้มข้นของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่ค่าสูง และความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนค่าสูง เมื่อมีการใช้ของไหลที่แตกต่างกันจะได้ผลดังนี้

เมื่อใช้ ของไหลพื้นฐานเป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะได้ค่า desirability 0.993851 แสดงถึงความง่ายต่อการปรับค่าตัวแปร B-Bottom flowrate และ E-Flow rate feed 2 จะได้ความบริสุทธิ์ของ IPA และปริมาณความร้อน (Q) สูงสุด โดยตั้งปรับค่า B-Bottom flowrate ค่าสูง และ E-Flow rate feed 2 ต่ำสุด จะได้ค่าตัวแปรตอบสนอง ปริมาณความร้อน (Q) 15343 KW ค่า LMTD 35.583 °C และความบริสุทธิ์ IPA 99.9486 % ดังรูปที่ 4.30



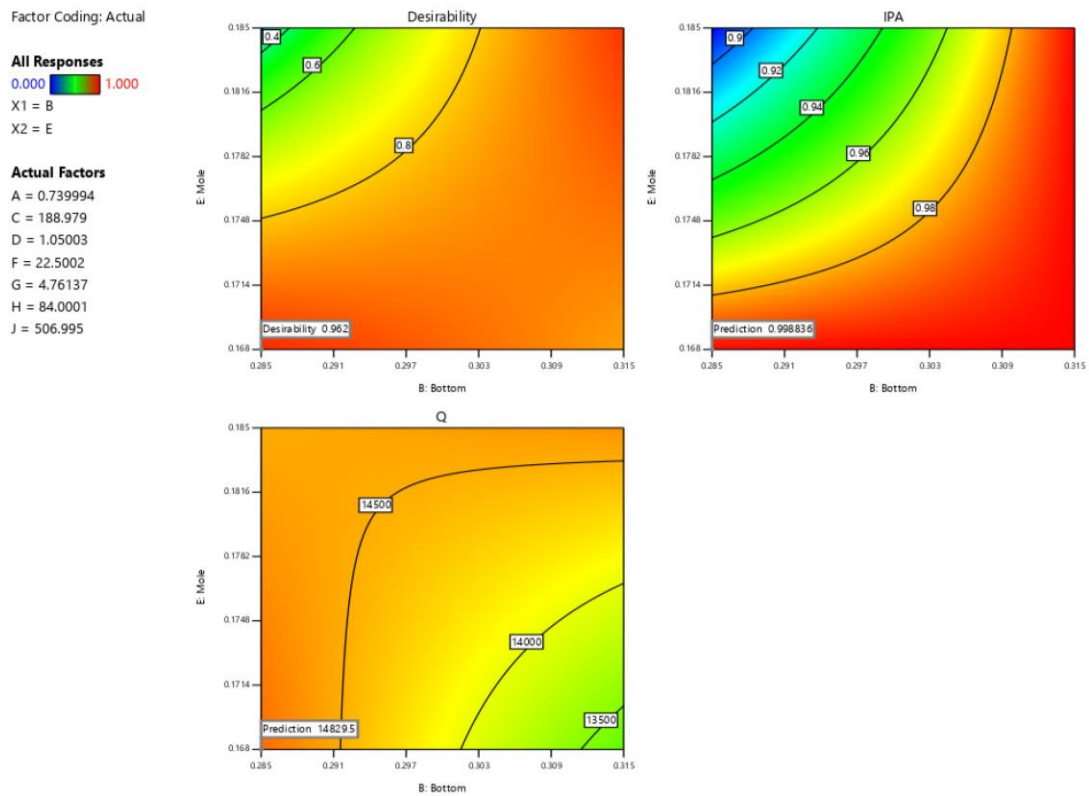
รูปที่ 4.30 ผลของตัวแปร B และ E ต่อปริมาณ (Q) และความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลพื้นฐานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องปรับค่าตัวแปร B-Bottom flowrate ค่าต่ำ และ E-Flow rate feed 2 ค่าสูง มีค่าความร้อน (Q) 14812 KW ค่า LMTD 34.1458 °C และความบริสุทธิ์ IPA 99.883 % ดังรูปที่ 4.31



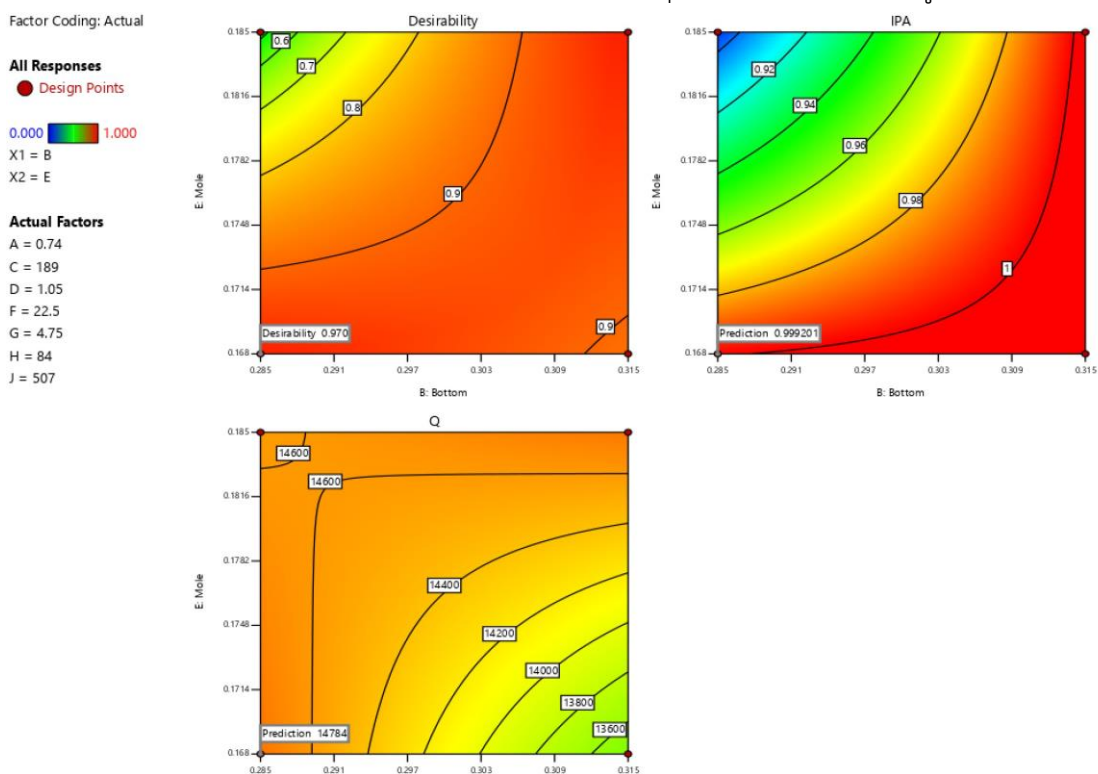
รูปที่ 4.31 ผลของตัวแปร B และ E ต่อปริมาณความร้อน (Q) และ ความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ CuO)

เมื่อใช้ (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องปรับค่าตัวแปร B-Bottom flowrate ค่าสูง และ E-Flow rate feed 2 ค่าต่ำ มีค่าความร้อนที่เกิดขึ้น 14822 KW ค่า LMTD 34.1448 °C และความบริสุทธิ์ IPA 99.873 % ดังรูป 4.32



รูปที่ 4.32 ผลของตัวแปร B และ E ต่อปริมาณความร้อน (Q) และ ความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (MWCNT+ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)

เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) เป็นของไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องปรับค่าตัวแปร B-Bottom flowrate ค่าสูง และ E-Flow rate feed 2 ค่าสูง และมีค่าความร้อนที่เกิดขึ้น 14756 KW ค่า LMTD 33.9703 °C และความบริสุทธิ์ IPA 99.857 % ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ผลของตัวแปร A และ B ต่อปริมาณความร้อน (Q) และ ความบริสุทธิ์ IPA เมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO)

จากการทดลองที่ต้องการดูประสิทธิภาพการนำความร้อนของของไหลพื้นฐานและของไหลไฮบริดนาโน โดยตัวแปรตอบสนองไอโซพรอพิลแอลกอฮอล์และค่าความร้อน เมื่อต้องการความเข้มข้นของไอโซพรอพิลแอลกอฮอล์ที่ค่าสูง และความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนค่าสูง พบว่าเมื่อใช้ของไหลพื้นฐานจะได้ค่า IPA สูงสุด แต่ใช้อัตราการไหลของของไหลพื้นฐานที่ 92 kg/sec ซึ่งมากกว่าของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) ที่ใช้อัตราการไหลของของไหลที่ 84 kg/sec และเมื่อดูค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน LMTD พบว่า ของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) มีค่า LMTD น้อยกว่าของไหลพื้นฐาน และเมื่อเปรียบเทียบของไหลไฮบริดนาโน พบว่าของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) มีค่า LMTD น้อยที่สุด หรือของไหลไฮบริดนาโน (CuO+MgO) สามารถถ่ายโอนความร้อนจากสารในระบบได้ดี และจากนั้นจึงนำสมบัติการไหลของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) ไปศึกษาหาค่าความดันลด เมื่ออัตราการไหลที่เท่ากับที่ใช้ในการทดลองความอ่อนไหว คือ 84 kg/sec และ 92 kg/sec

#### 4.6 การหาความดันลดภายในท่อ

การไหลของของไหลที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึง สมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลด้วย ดังนั้นเมื่อมีการนำของไหลไฮบริดนาโนประยุกต์ใช้การถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วหลังจากนั้นจึงประยุกต์ใช้สมบัติการไหลของของไหลไฮบริดนาโนที่มีประสิทธิภาพการนำความร้อนที่ดีที่สุดคือ ไฮบริดนาโน ( $\text{CuO}+\text{MgO}$ ) มาศึกษาสมบัติการไหลโดยใช้ค่าความหนาแน่น และค่าความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน เพื่อศึกษาถึงความดันลดภายในท่อ เมื่อนำของไหลไฮบริดนาโนไปใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเปรียบเทียบกับการใช้ของไหลพื้นฐาน โดยใช้ขนาดท่อเท่ากับขนาดภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] โดยมีขั้นตอนดังนี้

##### 4.6.1 การหาจำนวนเรย์โนลด์ (Re number)

การหาค่า Re- number สามารถหาได้จากสมการที่ (4.1) นำค่าที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction loss)

$$\text{สูตร } Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D_h}{\nu} = \frac{Q D}{\nu A} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล
$V$	คือ ความเร็วของของไหล
$D$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายในท่อ
$\mu$	คือ ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity)
$\nu$	คือ ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity)
$Q$	คือ อัตราการไหลโดยปริมาตร
$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดภายในของท่อ

#### 4.6.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction loss)

โดยแบ่งออกเป็น 2 จากค่าการไหลแบบราบเรียบค่า Laminar flow (Re number  $\leq 2300$ )

และการไหลแบบปั่นป่วน Turbulent flow (Re number  $>2300$ )

การหาค่า fiction loss ของการไหลแบบราบเรียบ Laminar flow ตามสมการที่ (4.2)

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (4.2)$$

การหาค่า fiction loss ของการไหลแบบปั่นป่วน Turbulent flow ตามสมการที่ (4.3)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right) \quad (4.3)$$

โดย  $\epsilon$  คือความขรุขระเฉลี่ยของท่อ,

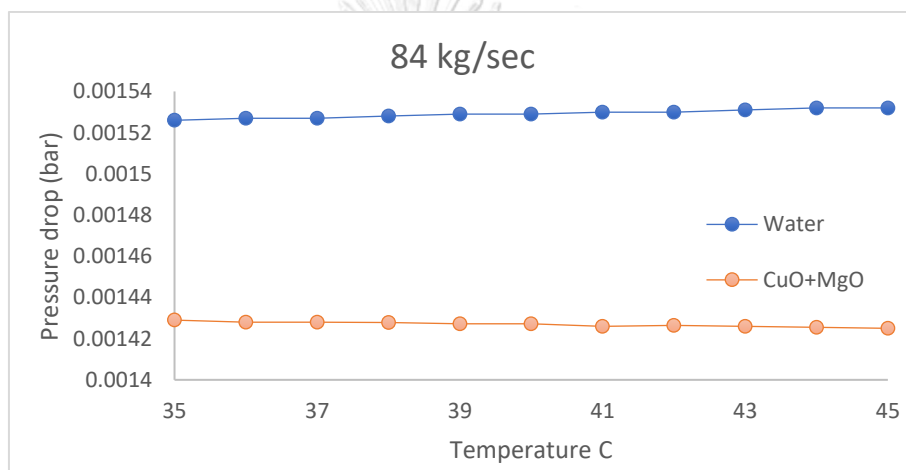
เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแล้วจึงนำไปหาค่าความดันลดภายในท่อโดยสมการ (4.4) โดยให้ขนาดของท่อเท่ากับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฮโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [4] เพื่อศึกษาค่าความดันลดเมื่อใช้ของไหลไฮบริดนาโนแทนของไหลพื้นฐาน

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.4)$$

เมื่อ

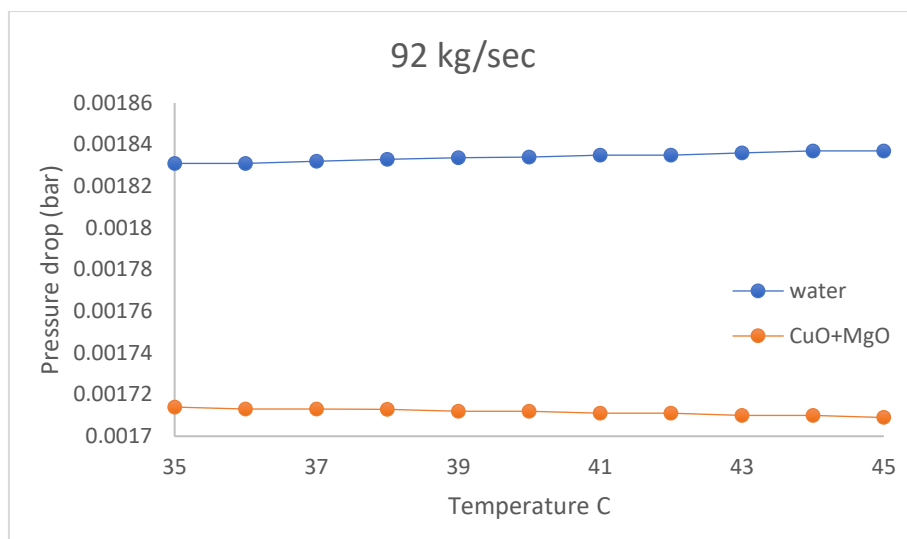
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล
$V$	คือ ความเร็วของของไหล
$f$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction loss)
$L$	คือ ความยาวท่อ

จากการคำนวณหาความดันลดภายในท่อ จากการใช้ของไหลไฮบริดนาโน ( $\text{CuO}+\text{MgO}$ ) ที่ อุณหภูมิที่ต่างกันเปรียบเทียบกับของไหลพื้นฐานคือน้ำ จากรูปภาพที่ 4.15 แสดงอัตราการไหลที่ 84 kg/sec และรูปภาพที่ 4.16 อัตราการไหล 92 kg/sec พบว่าของไหลไฮบริดนาโน มีความดันลด ค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้น ส่วนของไหลพื้นฐานคือมีความดันลดสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนืดลดลงส่งผลให้อัตราการไหลมากขึ้น ทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น และ ในอัตราการไหลที่เท่ากันของไหลพื้นฐานมีความดันลดมากกว่าของไหลไฮบริดนาโน เนื่องจากของไหล พื้นฐานมีความหนืดและและความหนาแน่นมากกว่า และส่งผลคำนวณอัตราการไหลต่ำกว่า และทำให้ได้ค่า ความดันลดต่ำกว่า



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความดันลดระหว่างของไหลพื้นฐาน และของไหลไฮบริดนาโนที่ 84 kg/sec





รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความดันลระหว่างของไหลพื้นฐาน และของไหลไฮบริดนาโนที่ 92 kg/sec



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลสมบัติทางความร้อนและสมบัติของของไหลไฮบริด และนำข้อมูลที่ได้มาทำการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมโดยเลือกโครงข่ายประสาทที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ไปทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางของไหล นำค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมไปจำลองการถ่ายโอนความร้อนของกระบวนการผลิตไฮโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากนั้นทำการประเมินความเป็นได้ของกรณีศึกษาความร้อนที่เกิดขึ้นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิต ต่อปริมาณการใช้ของไหลไฮบริดนาโน สรุปผลได้ดังต่อไปนี้

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับทำนายค่าการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนืด และความหนาแน่น ทั้งหมดใช้โครงข่ายประเภทส่งข้อมูลไปข้างหน้าและย้อนกลับ (FFB) ใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน 15 นิวรอน และใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (Active function) Tansig

การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริด พบว่าจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมของชั้นซ่อนคือ 15 นิวรอน โดยให้ค่า R เท่ากับ 0.999 และค่า MSE เท่ากับ 0.022 ค่า MAE เท่ากับ 0.04 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ 15 นิวรอน สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายสมบัติทางความร้อนและสมบัติการไหลของของไหลไฮบริด

การทำนายค่าการนำความร้อน พบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมคือ 12-15-15-1 โดยจำนวนนิวรอนชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นส่งออก ตามลำดับ และได้ค่า R เท่ากับ 0.9874, 0.9877 และ 0.9796 และค่า MSE เท่ากับ 0.0005, 0.0005 และ 0.0008 ค่า MAE เท่ากับ 0.0134, 0.0156 และ 0.0189 จากการ Train, Validate และ Test ตามลำดับ

การทำนายค่าความร้อนจำเพาะ พบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมคือ 12-15-15-1 โดยจำนวนนิวรอนชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นส่งออก ตามลำดับ และให้ค่า R เท่ากับ 0.9886, 0.9775 และ 0.9728, ค่า MSE เท่ากับ 0.0084, 0.0179 และ 0.0230 และค่า MAE เท่ากับ 0.0503, 0.0672 และ 0.0596 จากการ Train, Validate และ Test ตามลำดับ

การทำนายค่าความหนาแน่น พบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมคือ 12-15-15-1 โดยจำนวนนิวรอนชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นส่งออก ตามลำดับ และให้ค่า R เท่ากับ 0.9676, 0.9728

และ 0.9526 ค่า MSE เท่ากับ 0.0003, 0.0004 และ 0.0005 ค่า MAE เท่ากับ 0.0112, 0.0114 และ 0.0128 จากการ Train, Validate และ Test ตามลำดับ

การทำทำนายค่าความหนืด พบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมคือ 12-15-15-1 โดยจำนวนนิวรอน ชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นส่งออก ตามลำดับ และให้ค่า R เท่ากับ 0.9461, 0.9409 และ 0.9219 และค่า MSE เท่ากับ 0.0841, 0.0958 และ 0.1150 ค่า MAE เท่ากับ 0.1685, 0.1839 และ 0.1936 จากการ Train, Validate และ Test ตามลำดับ

นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว ไปทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนที่มีพื้นฐานข้อมูล 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ 293.15- 348.15 K และนำค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนไปหาค่าคงที่ P1-P5 เพื่อใช้เป็นค่าคงที่สำหรับการเพิ่มของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen plus และทำการตรวจสอบค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน พบว่าของไหลไฮบริดนาโนมีค่าสูงมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และของไหลไฮบริดนาโนที่มีค่าการนำความร้อนสูงที่สุดคือ CuO และ MgO

ผลจากการนำค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนประยุกต์ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรพบว่า ค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ด้านล่าง และ Reflux ratio มีผลต่อ ความเข้มข้นของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากการทดลองประสิทธิภาพการนำความร้อนของของไหลพื้นฐานและของไหลไฮบริดนาโน พบว่าของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) มีประสิทธิภาพการนำความร้อนดีที่สุดเมื่อเทียบกับของไหลไฮบริดนาโนด้วยกันและของไหลพื้นฐาน

ผลจากการจำลองหาค่าความดันลดโดยใช้ค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของของไหลไฮบริดนาโน (CuO+ MgO) พบว่า ที่อัตราการไหลของของไหลที่ใช้สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากัน ของไหลไฮบริดนาโนมีความดันลดน้อยกว่าของไหลพื้นฐานในอัตราการไหลที่เท่ากัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 เพื่อการใช้งานที่ง่ายขึ้น ควรมีการเพิ่มโครงข่ายประสาทเทียมในโปรแกรม Aspen plus

5.2 เพื่อการศึกษาที่สมบูรณ์ควรมีคุณสมบัติของของไหลไฮบริดให้ครบ เพื่อที่จะได้ทราบถึงประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ครอบคลุม

## บรรณานุกรม

1. Tutak, M. and J. Brodny, *Renewable energy consumption in economic sectors in the EU-27. The impact on economics, environment and conventional energy sources. A 20-year perspective.* Journal of Cleaner Production, 2022. **345**: p. 131076.
2. Hemmat Esfe, M., S. Esfandeh, and M.H. Kamyab, *Chapter 1 - History and introduction*, in *Hybrid Nanofluids for Convection Heat Transfer*, H.M. Ali, Editor. 2020, Academic Press. p. 1-48.
3. Sajid, M.U. and H.M. Ali, *Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **126**: p. 211-234.
4. Chua, W., G. Rangaiah, and K. Hidajat, *Design and optimization of isopropanol process based on two alternatives for reactive distillation.* Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017. **118**: p. 108-116.
5. Choi, S.U. and J.A. Eastman, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles.* 1995, Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
6. Turcu, R., et al., *New polypyrrole-multiwall carbon nanotubes hybrid materials.* Journal of optoelectronics and advanced materials, 2006. **8**(2): p. 643-647.
7. Pokhrel, N.R., et al., *Predicting NEPSE index price using deep learning models.* Machine Learning with Applications, 2022: p. 100385.
8. Mostafa, N., H.S.M. Ramadan, and O. Elfarouk, *Renewable energy management in smart grids by using big data analytics and machine learning.* Machine Learning with Applications, 2022. **9**: p. 100363.
9. Yadav, R.K. and Anubhav, *PSO-GA based hybrid with Adam Optimization for ANN training with application in Medical Diagnosis.* Cognitive Systems Research, 2020. **64**: p. 191-199.
10. Tadesse, M.G., et al., *Tactile Comfort Prediction of Functional Fabrics from Instrumental Data Using Intelligence Systems.* Fibers and Polymers, 2019. **20**(1): p. 199-209.
11. Dai, C., et al., *Chapter 1 - Thermodynamic fundamentals*, in *Special Distillation*

- Processes (Second Edition)*, Z. Lei, et al., Editors. 2022, Elsevier. p. 1-63.
12. Wilding, W.V., R.L. Rowley, and J.L. Oscarson, *DIPPR® Project 801 evaluated process design data*. Fluid Phase Equilibria, 1998. **150-151**: p. 413-420.
  13. Adun, H., et al., *Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO/water ternary hybrid nanofluid: Investigating the effects of temperature, volume concentration and mixture ratio on Specific heat capacity, and development of Hybrid machine learning for prediction*. Journal of Energy Storage, 2021. **41**: p. 102947.
  14. Weissman, S.A. and N.G. Anderson, *Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications*. Organic Process Research & Development, 2015. **19**(11): p. 1605-1633.
  15. Adun, H., et al., *A neural network-based predictive model for the thermal conductivity of hybrid nanofluids*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020. **119**: p. 104930.
  16. Ahmadloo, E. and S. Azizi, *Prediction of thermal conductivity of various nanofluids using artificial neural network*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016. **74**: p. 69-75.
  17. Tian, S., et al., *Using perceptron feed-forward Artificial Neural Network (ANN) for predicting the thermal conductivity of graphene oxide-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water-ethylene glycol hybrid nanofluid*. Case Studies in Thermal Engineering, 2021. **26**: p. 101055.
  18. Boroomandpour, A., D. Toghraie, and M. Hashemian, *A comprehensive experimental investigation of thermal conductivity of a ternary hybrid nanofluid containing MWCNTs- titania-zinc oxide/water-ethylene glycol (80:20) as well as binary and mono nanofluids*. Synthetic Metals, 2020. **268**: p. 116501.
  19. Hamid, K.A., et al., *Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanofluids*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **116**: p. 1143-1152.
  20. Sundar, L.S., M.K. Singh, and A.C.M. Sousa, *Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water hybrid nanofluids*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **52**: p. 73-83.
  21. Urmi, W., M.M. Rahman, and W.A.W. Hamzah, *An experimental investigation on*

- the thermophysical properties of 40% ethylene glycol based TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020. **116**: p. 104663.
22. Akilu, S., A.T. Baheta, and K.V. Sharma, *Characterization and modelling of density, thermal conductivity, and viscosity of TiN-W/EG nanofluids.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020. **140**(4): p. 1999-2010.
  23. Said, Z., *Thermophysical and optical properties of SWCNTs nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016. **78**: p. 207-213.
  24. Sabiha, M.A., et al., *Experimental investigation on thermo physical properties of single walled carbon nanotube nanofluids.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016. **93**: p. 862-871.
  25. Nabil, M.F., et al., *An experimental study on the thermal conductivity and dynamic viscosity of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanofluids in water: Ethylene glycol mixture.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017. **86**: p. 181-189.
  26. Esfahani, N.N., D. Toghraie, and M. Afrand, *A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO-Ag (50%-50%)/water hybrid nanofluid: An experimental study.* Powder Technology, 2018. **323**: p. 367-373.
  27. Pandey, S.D. and V.K. Nema, *Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2012. **38**: p. 248-256.
  28. Agarwal, A., R. Marumo, and M.T. Letsatsi, *Numerical analysis of tube flow with helical insert using nano fluid to enhance heat transfer.* Materials Today: Proceedings, 2021. **47**: p. 5093-5097.
  29. Kumar, V. and J. Sarkar, *Particle ratio optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MWCNT hybrid nanofluid in minichannel heat sink for best hydrothermal performance.* Applied Thermal Engineering, 2020. **165**: p. 114546.
  30. Shahul Hameed, M., S. Suresh, and R.K. Singh, *Comparative study of heat transfer and friction characteristics of water-based Alumina-copper and Alumina-CNT hybrid nanofluids in laminar flow through pipes.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019. **136**(1): p. 243-253.
  31. Verma, S.K., et al., *Performance analysis of hybrid nanofluids in flat plate solar*

- collector as an advanced working fluid*. Solar Energy, 2018. **167**: p. 231-241.
32. Pak, B.C. and Y.I. Cho, *HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES*. Experimental Heat Transfer, 1998. **11**(2): p. 151-170.
33. Pantzali, M., et al., *Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009. **30**(4): p. 691-699.
34. Mousavi, S.M., F. Esmailzadeh, and X.P. Wang, *Effects of temperature and particles volume concentration on the thermophysical properties and the rheological behavior of CuO/MgO/TiO<sub>2</sub> aqueous ternary hybrid nanofluid*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019. **137**(3): p. 879-901.
35. Goodarzi, M., et al., *Investigation of heat transfer and pressure drop of a counter flow corrugated plate heat exchanger using MWCNT based nanofluids*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015. **66**: p. 172-179.
36. Wanatasanappan, V.V., M.Z. Abdullah, and P. Gunnasegaran, *Thermophysical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO hybrid nanofluid at different nanoparticle mixture ratio: An experimental approach*. Journal of Molecular Liquids, 2020. **313**: p. 113458.
37. Rahimi, A., et al., *Natural convection analysis employing entropy generation and heatline visualization in a hollow L-shaped cavity filled with nanofluid using lattice Boltzmann method- experimental thermo-physical properties*. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2018. **97**: p. 82-97.
38. Giwa, S.O., M. Sharifpur, and J.P. Meyer, *Experimental study of thermo-convection performance of hybrid nanofluids of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MWCNT/water in a differentially heated square cavity*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. **148**: p. 119072.
39. Barbés, B., et al., *Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013. **111**(2): p. 1615-1625.
40. Barbés, B., et al., *Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of CuO nanofluids*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,

2014. **115**(2): p. 1883-1891.
41. Selvam, C., D. Mohan Lal, and S. Harish, *Thermal conductivity and specific heat capacity of water–ethylene glycol mixture-based nanofluids with graphene nanoplatelets*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017. **129**(2): p. 947-955.
  42. Verma, S.K., A.K. Tiwari, and D.S. Chauhan, *Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids*. Energy Conversion and Management, 2017. **134**: p. 103-115.
  43. Kumaresan, V. and R. Velraj, *Experimental investigation of the thermo-physical properties of water–ethylene glycol mixture based CNT nanofluids*. Thermochemica Acta, 2012. **545**: p. 180-186.
  44. Wole-Osho, I., et al., *An experimental investigation into the effect of particle mixture ratio on specific heat capacity and dynamic viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO hybrid nanofluids*. Powder Technology, 2020. **363**: p. 699-716.
  45. Teng, T.-P. and Y.-H. Hung, *Estimation and experimental study of the density and specific heat for alumina nanofluid*. Journal of Experimental Nanoscience, 2014. **9**(7): p. 707-718.
  46. Fazeli, I., M.R. Sarmasti Emami, and A. Rashidi, *Investigation and optimization of the behavior of heat transfer and flow of MWCNT-CuO hybrid nanofluid in a brazed plate heat exchanger using response surface methodology*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021. **122**: p. 105175.
  47. Tiwari, A.K., et al., *Experimental comparison of specific heat capacity of three different metal oxides with MWCNT/ water-based hybrid nanofluids: proposing a new correlation*. Applied Nanoscience, 2020.
  48. Pattanayak, B., et al., *Synthesis, Characterisation and Heat Transfer Analysis of TiO<sub>2</sub>-Water Nanofluid 1*. Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, 2018. **14**.
  49. Gupta, N.K., et al., *A review of thermo physical properties of nanofluids*. Materials Today: Proceedings, 2019. **18**: p. 968-978.
  50. Hussein, A.M., et al., *Experimental measurement of nanofluids thermal properties*. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering,



2013. **7**: p. 850.
51. Hung, Y.-H., J.-H. Chen, and T.-P. Teng, *Feasibility Assessment of Thermal Management System for Green Power Sources Using Nanofluid*. Journal of Nanomaterials, 2013. **2013**: p. 321261.
  52. Giwa, S.O., M. Sharifpur, and J.P. Meyer, *Experimental investigation into heat transfer performance of water-based magnetic hybrid nanofluids in a rectangular cavity exposed to magnetic excitation*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020. **116**: p. 104698.
  53. Ganeshkumar, J., et al., *Experimental study on density, thermal conductivity, specific heat, and viscosity of water-ethylene glycol mixture dispersed with carbon nanotubes*. Thermal Science, 2017. **21**: p. 255-265.
  54. Xuan, Z., et al., *Thermo-economic performance and sensitivity analysis of ternary hybrid nanofluids*. Journal of Molecular Liquids, 2021. **323**: p. 114889.
  55. Hemmat Esfe, M., et al., *Viscosity and rheological properties of antifreeze based nanofluid containing hybrid nano-powders of MWCNTs and TiO<sub>2</sub> under different temperature conditions*. Powder Technology, 2019. **342**: p. 808-816.
  56. Ruhani, B., et al., *Statistical investigation for developing a new model for rheological behavior of ZnO–Ag (50%–50%)/Water hybrid Newtonian nanofluid using experimental data*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019. **525**: p. 741-751.
  57. Zareie, A. and M. Akbari, *Hybrid nanoparticles effects on rheological behavior of water-EG coolant under different temperatures: An experimental study*. Journal of Molecular Liquids, 2017. **230**: p. 408-414.
  58. Nguyen, C.T., et al., *Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007. **28**(6): p. 1492-1506.
  59. Nguyen, C.T., et al., *Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?* International Journal of Thermal Sciences, 2008. **47**(2): p. 103-111.
  60. Hamid, K.A., et al., *Investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid Viscosity for Different Water/EG Mixture Based*. Energy Procedia, 2015. **79**: p. 354-359.

61. Pantzali, M.N., et al., *Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009. **30**(4): p. 691-699.
62. Ho, C.J., et al., *Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study*. International Journal of Thermal Sciences, 2010. **49**(8): p. 1345-1353.
63. Vajjha, R.S., D.K. Das, and B.M. Mahagaonkar, *Density Measurement of Different Nanofluids and Their Comparison With Theory*. Petroleum Science and Technology, 2009. **27**(6): p. 612-624.
64. Hwang, K.S., S.P. Jang, and S.U.S. Choi, *Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed laminar flow regime*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(1): p. 193-199.
65. Mahian, O., A. Kianifar, and S. Wongwises, *Dispersion of ZnO Nanoparticles in a Mixture of Ethylene Glycol–Water, Exploration of Temperature-Dependent Density, and Sensitivity Analysis*. Journal of Cluster Science, 2013. **24**(4): p. 1103-1114.
66. Heyhat, M.M., et al., *Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012. **39**(8): p. 1272-1278.
67. Brzóška, K., et al., *Thermophysical Properties of Nanofluids Composed of Ethylene Glycol and Long Multi-Walled Carbon Nanotubes*. Fluids, 2020. **5**(4): p. 241.
68. YOUSAF, A.B., et al., *INFLUENCE OF PARTICLE SIZE ON DENSITY, ULTRASONIC VELOCITY AND VISCOSITY OF MAGNETITE NANOFLUIDS AT DIFFERENT TEMPERATURES*. Nano, 2014. **09**(08): p. 1450089.
69. Said, Z. and R. Saidur, *Thermophysical properties of metal oxides nanofluids*. Nanofluid heat and mass transfer in engineering problems, 2017: p. 39.
70. Bendaraa, A., M.M. Charafi, and A. Hasnaoui, *Numerical and experimental investigation of alumina-based nanofluid effects on double-pipe heat*

- exchanger thermal performances*. SN Applied Sciences, 2021. **3**(2): p. 172.
71. Selvam, C., D. Mohan Lal, and S. Harish, *Heat transport and pressure drop characteristics of ethylene Glycol-based Nano fluid containing silver nanoparticles*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. **402**: p. 012005.
72. Solairajan, A.S., S. Alexraj, and P.V. Rajan, *Experimental Investigation on Thermophysical Properties of Nanofluids*. Journal of emerging technologies and innovative research, 2015.
73. Lee, S., et al., *Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles*. 1999.
74. Wang, X., X. Xu, and S.U. Choi, *Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture*. Journal of thermophysics and heat transfer, 1999. **13**(4): p. 474-480.
75. Arifin, S. and I.-L. Chien, *Design and control of an isopropyl alcohol dehydration process via extractive distillation using dimethyl sulfoxide as an entrainer*. Industrial & engineering chemistry research, 2008. **47**(3): p. 790-803.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สหัสวัต แซวรัมย์
วัน เดือน ปี เกิด	14 กรกฎาคม 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
วุฒิการศึกษา	มหาวิทยาลัยบูรพา เทคโนโลยีเคมี ทล.บ. เคมี
ที่อยู่ปัจจุบัน	119/122 หมู่บ้านกัลปพฤกษ์ศรีเงิน ตำบลทับมา อำเภอเมือง จังหวัดระยอง 21000

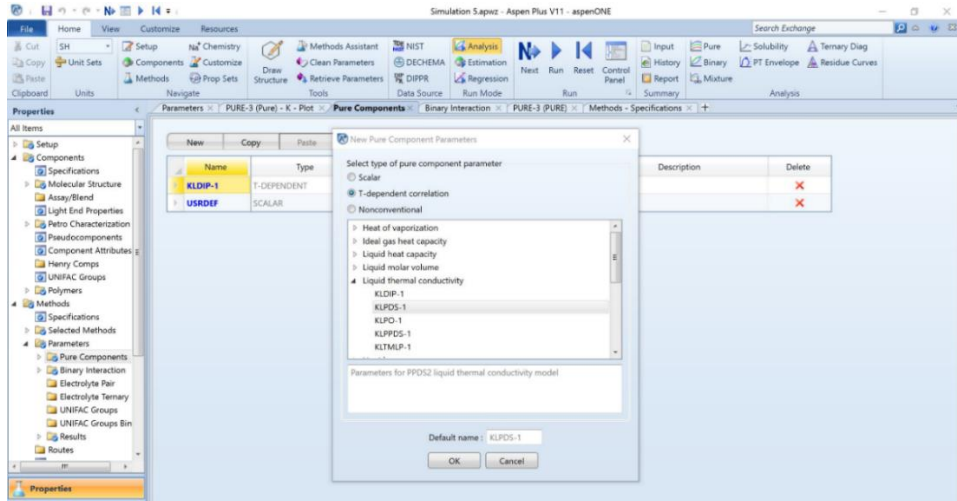


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

### 1. การเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโนในโปรแกรม Aspen Plus

1. กำหนด สารใหม่ (Pure component) เลือก KLPDS-1 หลังจากนั้นกด OK ดังรูปที่ ก 2



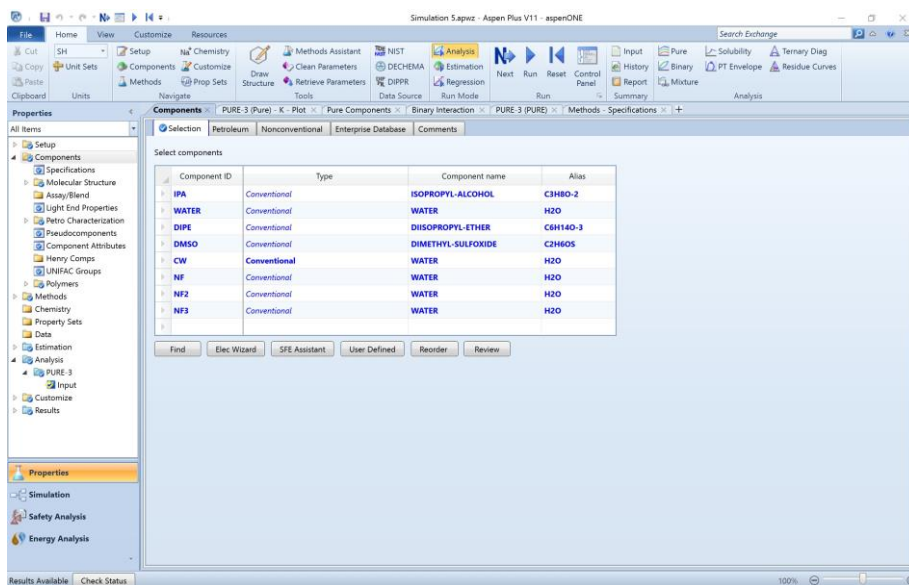
รูปที่ ก.1 การสร้างสารประกอบใหม่

2. โปรแกรมจะให้ใส่ตัวแปรที่ 1-5 โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟเอ็กเซลหาตัวแปรที่ 1-5 โดยใช้ฟังก์ชัน =LINEST(F20:F75,D20:D75^(1,2,3,4)) โดยค่า F20:F75 ค่าอุณหภูมิ, D20:D75 ค่าการนำความร้อนจากอุณหภูมิ F20:F75 หลังจากนั้นจะได้ค่าตัวแปร P1-P5 ให้ส่งในช่วงตัวแปรที่ 1-5 ส่วนตัวแปรที่ 6 คือค่าอุณหภูมิต่ำสุด ตัวแปรที่ 7 คือค่าอุณหภูมิสูงสุด ดังรูปที่ ก 2

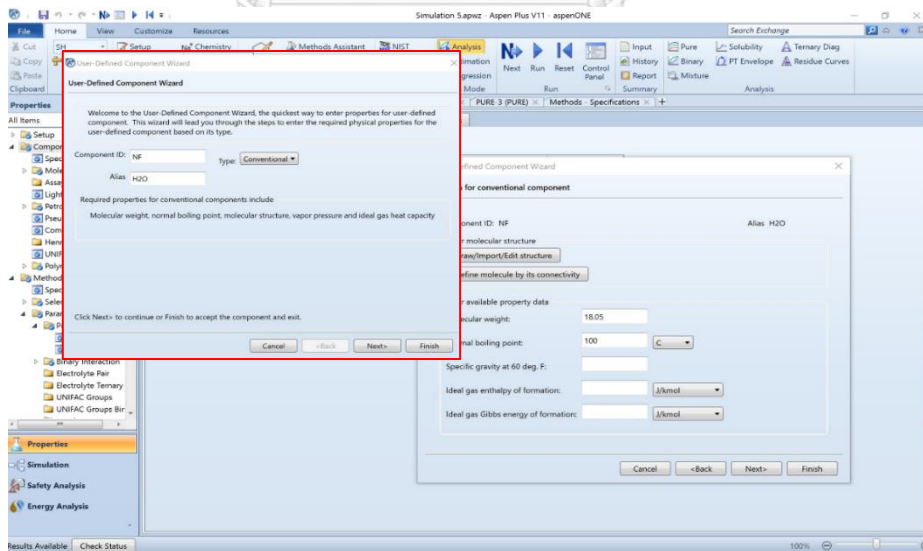
Component	Source	Units	Property units	1	2	3	4	5	6	7
NP	USER	K	Watt/m-K	-55.1529	0.708459	-0.00935475	6.99998e-06	-5.41177e-09	273.15	1273.15
NP2	USER	K	Watt/m-K	161.62	-2.04337	0.009651065	-2.043366824	161.6204	273.15	1273.15
NP3	USER	K	Watt/m-K	-378.169	4.83682	-0.0230773	4.836825231	-378.169	273.15	1273.15

รูปที่ ก.2 การใส่ค่าตัวแปร

3.ระบุงค์ประกอบของสารกตเลือก Component เลือกสารที่ตองการระบุงค์ประกอบ กตเลือก User identifie กต Next ดั่งรูปที่ ก 3ใส่ Molecular weight 18.05 และกต finish ดั่งรูปที่ ก 4

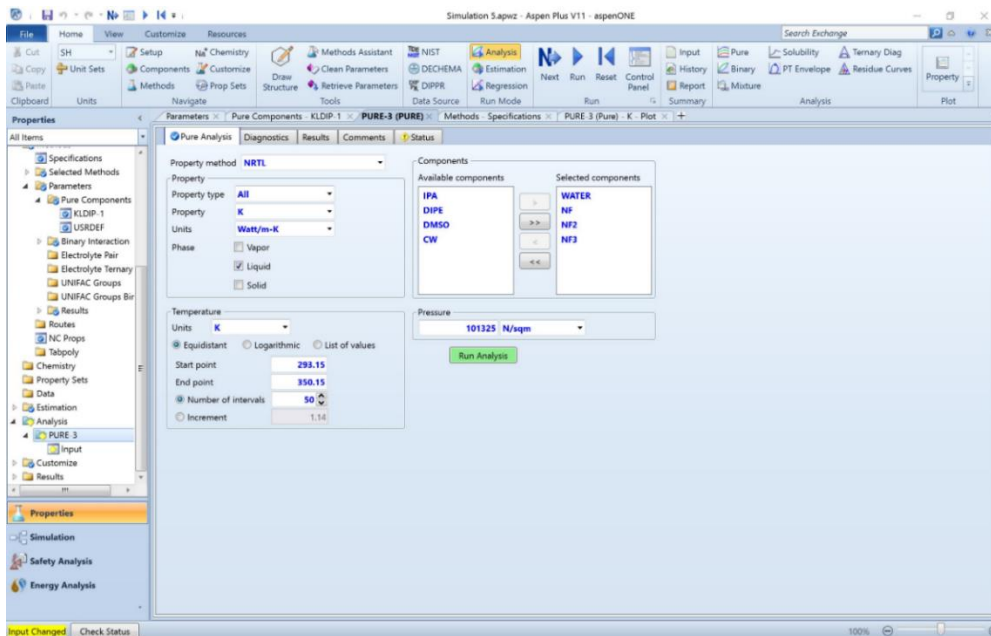


รูปที่ ก.3 การระบุงค์ประกอบสารประกอบใหม่

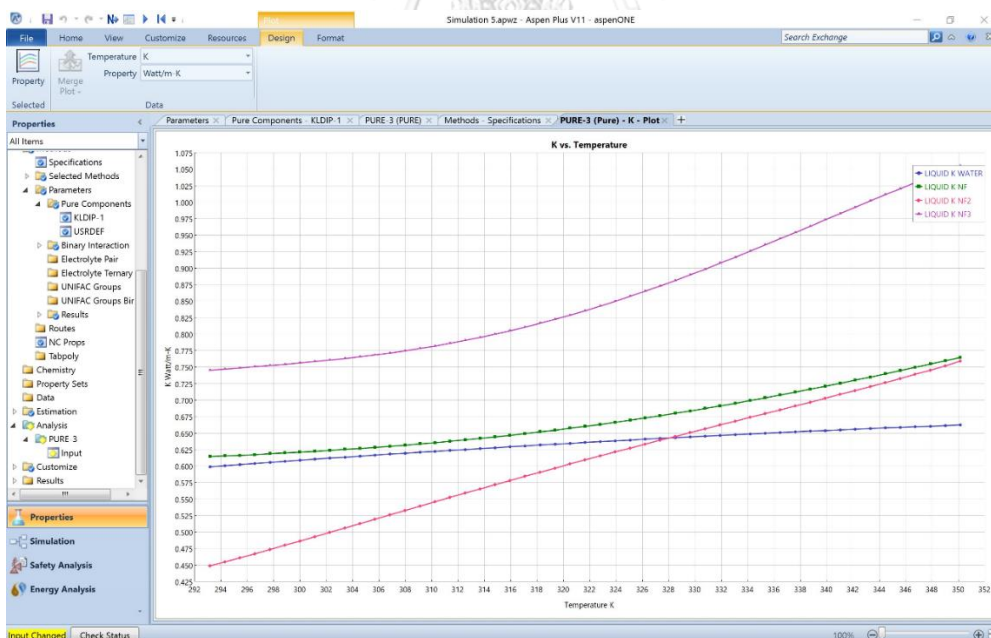


รูปที่ ก.4 แสดงการใส่หน้าหนักโมเลกุล

4. ตรวจสอบคุณสมบัติของของไหล โดยเลือก Analysis กดเลือก Pure ทำการเลือกไฮบริดนาโนที่ต้องการวิเคราะห์ ใส่อุณหภูมิ และกดเลือก Run analysis ดังรูปที่ ก 5 และได้ผลดังรูปที่ ก 6

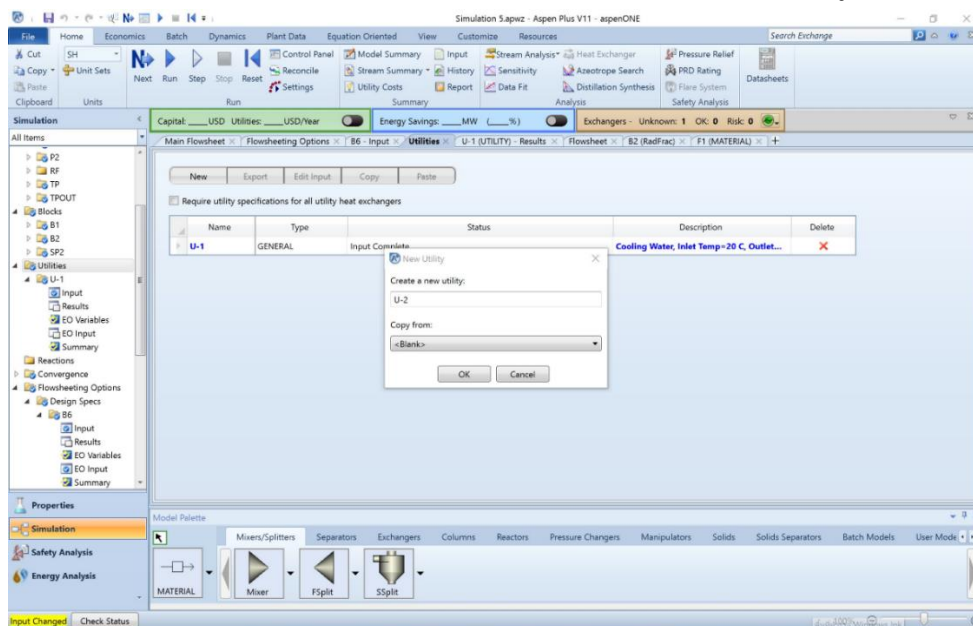


รูปที่ ก.5 การตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบ



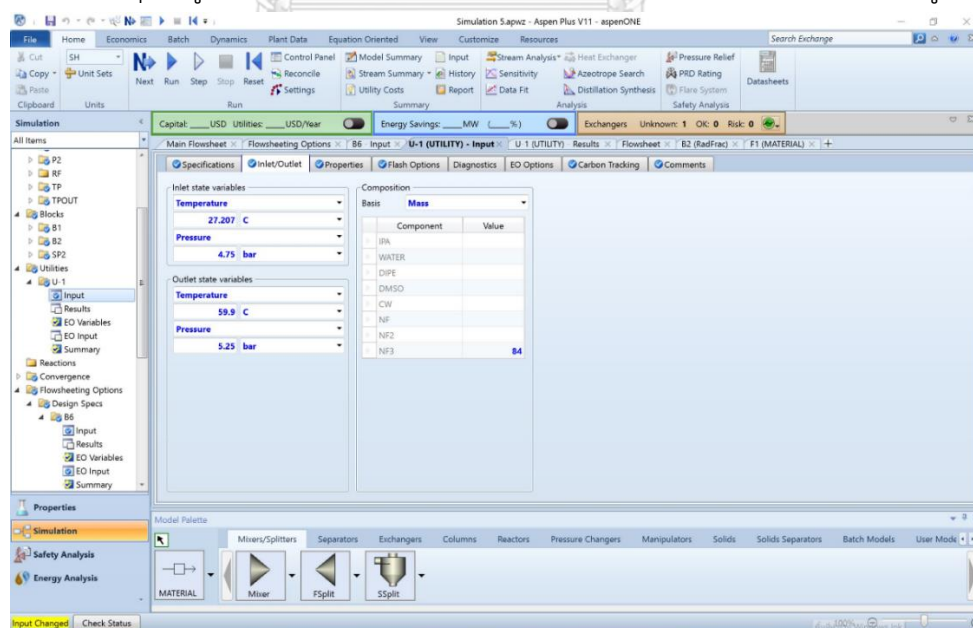
รูปที่ ก.6 ค่าการนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน

5. หลังจากตรวจสอบคุณสมบัติค่า การนำความร้อนของของไหลไฮบริดนาโน ตรงกับค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม หลังจากนั้นทำการเพิ่มของไหลไฮบริดนาโนเพื่อใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เริ่มจาก Utility กดเลือก New Copy form เลือก Blank กด OK ตามรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 การเพิ่มไฮบริดนาโนสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

6. ใส่ค่าอุณหภูมิและความดันเข้าของของไหลไฮบริดนาโน ตามค่าที่ต้องการดังรูปที่ ก.8

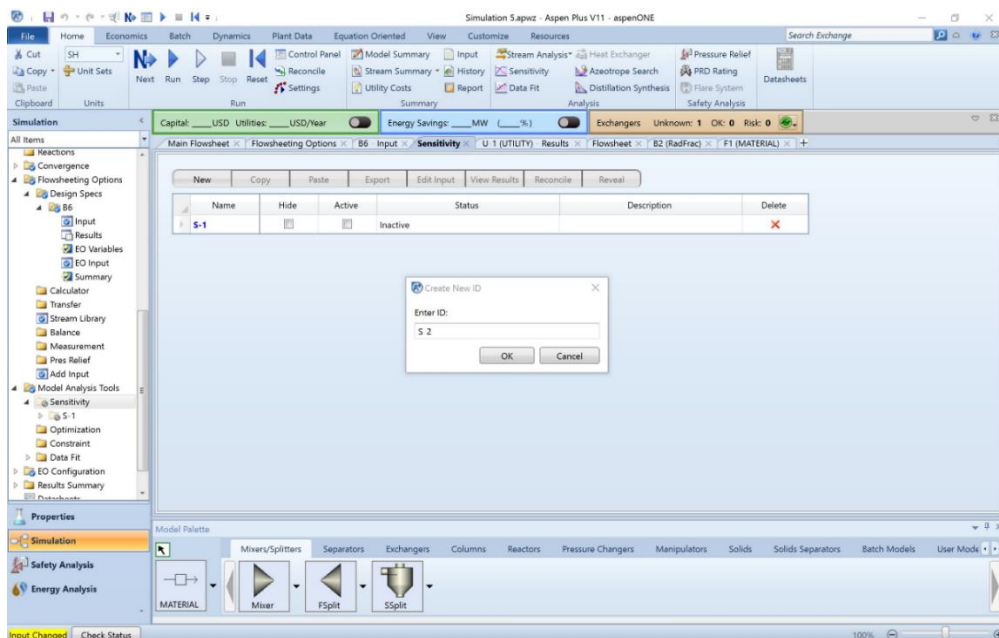


รูปที่ ก.8 การใส่ค่าอุณหภูมิและความดันของของไหลไฮบริดนาโน



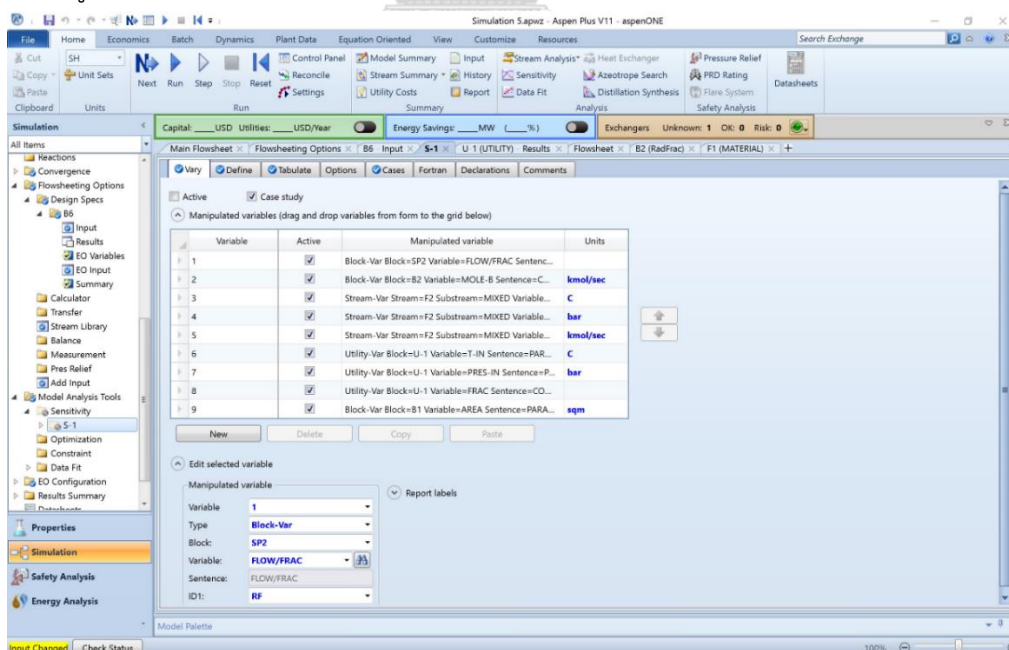
## 2. การทดสอบความอ่อนไหวในโปรแกรม Aspen plus

1. โดยเริ่มจาก Model Analysis เลือก Sensitivity กดเลือก New เลือก OK ดังรูปที่ ก 9

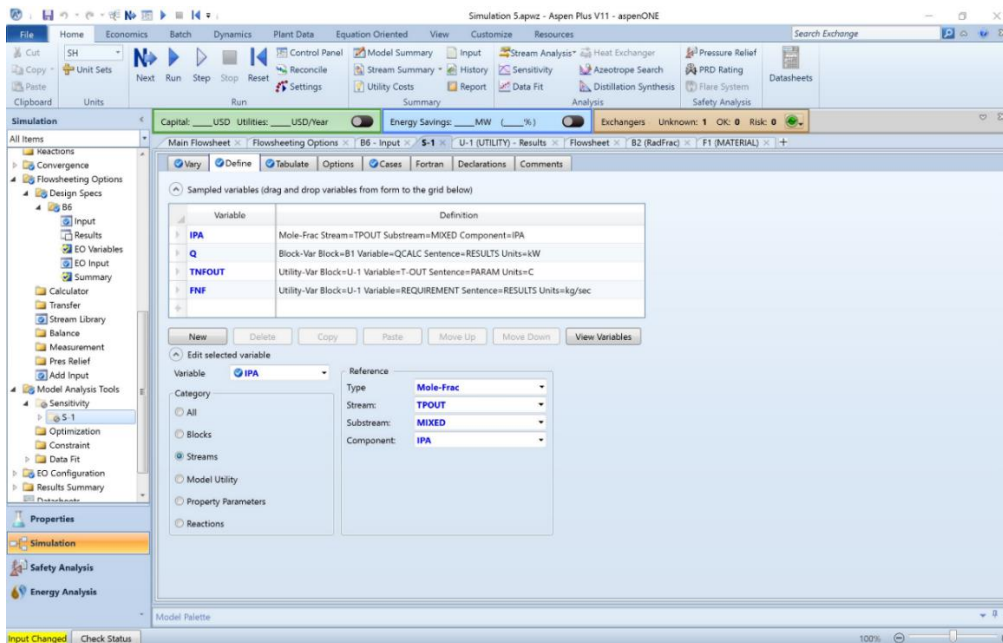


รูปที่ ก.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร

8. ทำการเลือกตัวแปรต้น (Vary) ตัวแปรตอบสนอง (Define) โดยใส่หน่วยให้ถูกต้อง ดังรูปที่ ก 10 และรูปที่ ก 11

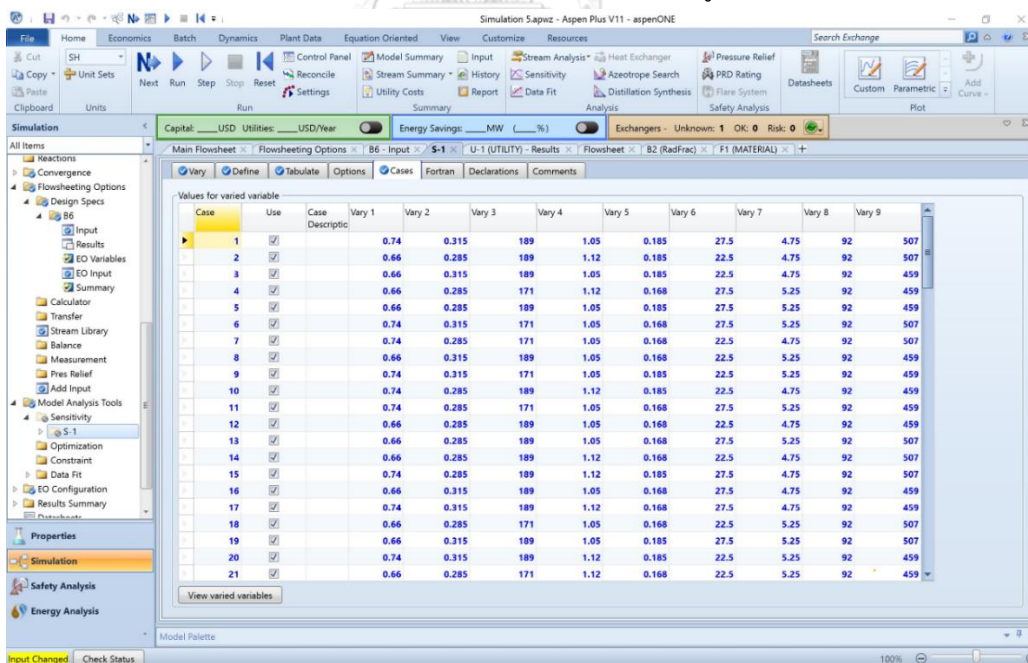


รูปที่ ก.10 การเพิ่มตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ความอ่อนไหว



รูปที่ ก.11 การเพิ่มตัวแปรตอบสนอง

9.ใส่ค่าตัวแปรที่ได้จากโปรแกรม Design expert หลังจากนั้นกด Run สอบผลที่ได้ และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยโปรแกรม Design expert ดังรูปที่ ก 12



รูปที่ ก.12 การใส่ค่าตัวแปร

## ภาคผนวก ข

### 1. ค่า $W_i$ และ $b$ ของโครงข่ายประสาทเทียมของค่าการนำความร้อน

ตารางที่ ข.1 ค่า  $W_i$  และ  $b$  ของชั้นซ่อนที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าการนำความร้อน

$b_1$	$W_{1\_1}$																			
2.22173	-0.74439	1.185536	-0.59442	1.061431	-0.08684	-0.058461	0.513146	0.598881	0.848084	-0.16941										
1.715114	-0.72739	0.218125	-0.42836	-0.98257	-0.32821	0.193306	0.747002	0.336669	-0.92137	-0.26897										
-1.29447	0.736593	-1.36453	0.225939	-0.28439	-0.78406	-1.004776	-0.66564	-0.45683	-0.83523	0.209147										
-1.39628	-0.02438	-0.13997	0.44053	-0.47588	-1.15675	-0.379134	-0.19547	-0.59633	-0.98633	-0.79285										
-0.77844	0.360103	1.003691	-0.46642	-1.76842	0.13692	0.281147	0.037788	0.126069	0.501557	0.082182										
0.54215	-0.50102	0.011955	0.042256	-1.00107	-0.07955	-0.621993	1.197878	-0.80099	0.817757	0.979894										
0.367343	-0.50965	0.296605	0.467402	1.900051	-0.45296	0.918328	-0.07946	-0.55335	0.181299	-1.09681										
-0.01163	-0.35427	0.656118	0.522838	0.094223	0.355893	-0.621984	-0.43494	-0.43197	-1.45828	0.427003										
-0.05112	-0.51586	-0.26343	0.945635	0.728821	-0.24046	-0.940504	0.276394	-0.13382	0.009925	0.774235										
0.994649	0.95524	0.042752	-1.08814	1.038444	0.29334	0.068973	-0.98416	0.270731	-0.2206	-0.00177										
0.867448	0.938108	-0.96939	-0.06491	-0.02791	0.80824	-0.240317	-0.94581	0.60751	-0.73319	0.397055										
-1.32866	-0.39612	-0.93559	0.456327	-0.39765	0.290857	0.741224	-0.09795	0.758366	-0.10201	-0.69496										
1.407316	-0.12003	1.161791	-0.00081	-1.04454	0.302493	0.297878	0.699252	1.097514	0.835612	-0.30964										
1.430103	0.570994	-0.94682	1.198907	-0.26605	0.633063	0.489731	0.335853	0.970825	0.21323	-0.58272										
1.875083	0.685238	-0.19439	0.941949	-0.46096	0.181182	0.207036	0.787853	-0.53499	-0.95118	-0.31214										







3. ค่า  $W_i$  และ  $b$  ของโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความหนืด

ตารางที่ ข.5 ค่า  $W_i$  และ  $b$  ของชั้นซ่อนที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความหนืด

b1	lw1_1																	
-1.90338	0.359292	0.807394	0.080319	0.78633	0.232088	-0.619767	1.007116	0.087197	0.102831	-0.52147								
1.606744	-0.14058	0.829558	-0.10948	0.655338	0.075997	0.723287	-0.92322	-1.00289	0.512415	-0.2359								
1.535435	-0.79921	-0.20966	-0.65538	-0.82808	0.761663	0.220892	-0.37245	-0.81108	0.21559	1.23304								
1.044486	-0.29318	-0.59163	-0.72596	0.972757	1.183825	0.002868	0.078651	-0.78505	-1.03677	-0.78828								
0.847645	-0.5353	0.648286	0.027951	-0.38131	0.159667	1.528837	0.360996	-0.45226	-0.73111	0.604645								
1.043394	-0.8001	-0.60476	-1.38571	1.59629	0.020819	0.543908	0.167825	-0.04984	-1.01987	0.825457								
0.097385	0.344336	-0.76656	-0.46669	0.070248	1.25378	0.406225	0.638925	0.770867	-0.06089	-0.50879								
-0.11239	-0.06591	-0.16875	-0.4276	-0.76897	-0.92017	-0.763219	-0.85042	0.766066	0.450844	1.013525								
-0.15812	-0.42477	1.033597	-0.89208	-0.66694	0.058814	-0.491757	1.216775	-0.2962	-0.29562	-0.023								
-0.53444	-1.35879	0.850925	-1.15636	-0.5258	0.390202	-0.449508	-0.33898	1.819725	0.122354	0.033671								
0.603633	1.505486	-0.41519	-0.12823	-1.16921	0.424193	-0.662761	-1.02744	1.322538	-0.24172	-0.2216								
1.207942	1.075085	0.254366	0.604678	0.574834	-0.50869	0.32197	0.636596	-0.4566	-0.55189	-0.80358								
-1.84003	-0.89136	0.559126	0.883816	0.001194	0.170338	1.447128	-0.02323	-0.0871	-0.05571	-0.86778								
1.139092	0.762105	-1.5653	0.865014	-1.00481	-0.67423	-0.315819	0.067378	0.789235	1.334775	-0.25597								
1.549454	1.007346	0.112316	1.560434	-1.29649	-0.81719	-0.388188	-0.47199	0.821137	0.721158	0.219688								





4. ค่า  $W_i$  และ  $b$  ของโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความหนาแน่น

ตารางที่ ข.7 ค่า  $W_1$  และ  $b$  ของชั้นซ่อนที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความหนาแน่น

<b>b1</b>	<b>IW1_1</b>																		
-1.8284	0.793893	-0.67687	0.098797	-0.79463	0.218384	-0.849222	-0.41373	-0.4431	-0.20444	-0.91218									
1.672157	-0.33762	-0.96117	0.7508	0.643726	0.482828	0.625423	-0.22366	-0.29863	0.151094	0.166727									
1.25594	-0.88387	0.740975	0.045459	0.501679	0.350545	-0.742645	0.635515	-0.62555	0.877979	0.752712									
1.141952	-0.44391	-0.80574	-0.30688	0.461609	0.89538	-0.833043	-0.18312	0.692114	-0.25966	0.156782									
0.737708	-0.44671	1.049232	0.748093	0.279728	0.181656	-0.020325	-1.0487	-0.68834	0.797326	-0.61314									
-0.46554	0.130089	0.46089	-0.8721	0.680131	-0.70518	-0.683681	-0.44879	-0.83718	-0.50844	-0.34786									
0.194192	-0.61178	0.019792	0.733806	0.796946	-0.4453	0.758498	-0.18119	-0.25774	0.542158	-0.00636									
-0.02244	0.334595	0.011363	0.765057	-0.18238	0.779844	0.610502	0.557021	-0.60274	0.294546	0.944946									
0.168153	0.370597	-0.48167	0.361414	0.652441	-1.03936	0.410694	1.036115	0.063264	0.14582	-0.56429									
-0.39226	-0.5979	-0.04222	-0.51187	-0.70246	-0.15474	-0.666609	-1.03371	-0.5148	0.276105	0.572866									
-0.92468	-0.74365	0.888787	-0.76626	-1.16773	-0.62555	0.087798	0.2619	0.705391	0.336671	0.342288									
-1.108704	-0.32648	-0.02821	-0.25914	0.332991	1.16589	0.023032	-0.02625	0.963607	-0.71454	-0.24815									
-1.44228	-0.29857	-0.03509	0.155971	0.206212	0.783604	0.823007	-0.25906	-0.82503	-0.6229	-0.5267									
-1.54448	-0.10772	-0.7307	-0.7652	0.263932	0.008148	0.332801	0.370902	0.598565	1.24554	-0.15152									
1.767474	-0.06172	0.053143	0.706132	1.121872	-0.16085	0.642796	0.442955	-0.49056	-0.67859	-0.12388									

ตารางที่ ข.8 ค่า  $W_2$  และ  $b$  ของชั้นซ้อนที่ 2 ของโครงข่ายประสาทเทียมค่าความแม่นยำ

<b>b2</b>	<b>iw2_1</b>																					
1.6445	-0.7234	0.6961	0.3305	0.1028	0.4040	0.4074	0.0598	0.3853	-0.1638	0.2225	0.4188	-0.0899	-0.8015	0.4705	-0.1597							
-1.4396	0.1224	0.5742	0.1982	-0.1373	-0.3185	-0.6829	-0.4423	0.2680	0.4982	0.2239	0.5866	-0.5037	-0.2498	0.6357	0.3759							
1.1242	-0.4829	0.5521	-0.6381	-0.6033	0.2631	0.1559	0.3786	0.2867	0.4362	0.2290	0.6884	0.2463	-0.1209	-0.3686	0.6951							
0.8288	-0.4085	-0.4211	-0.5884	-0.3582	0.2911	-0.0195	-0.3797	0.7350	-0.5791	0.4555	-0.4678	-0.2211	-0.3438	0.3499	0.4414							
-0.7473	-0.0440	0.1543	-0.2087	-0.7379	-0.7111	0.1125	0.8348	-0.6601	0.1357	0.1478	-0.5033	-0.7215	-0.4691	-0.0741	-0.2940							
0.4544	-0.2692	-0.5404	-0.0350	-0.3375	-0.2690	0.4855	-0.1572	0.2723	0.0818	0.8632	0.3219	0.3619	0.5438	0.5170	0.0379							
0.1609	-0.8108	0.0200	0.6834	0.2105	-0.7587	-0.5051	0.4522	-0.3124	-0.1544	-0.2773	-0.7251	-0.3420	-0.2867	0.5518	-0.8034							
-0.1451	0.0807	-0.2425	-0.0193	-0.0548	0.2143	0.7119	-0.6066	-0.5719	0.3975	-0.6457	-0.2174	0.1370	0.6402	-0.5452	-0.5249							
-0.2569	-0.4190	-0.6141	0.5518	-0.1222	0.5068	-0.1407	-0.1065	0.1798	-0.1976	-0.7389	0.3493	0.2780	-0.1848	0.6720	-0.6692							
0.5817	0.1682	-0.2491	0.1314	0.3484	-0.3210	-0.4399	-0.8823	-0.3208	-0.2699	-0.4389	0.2605	-0.2317	0.3254	0.5405	0.3318							
0.6851	0.7823	-0.0468	0.9376	-0.1068	0.6279	-0.6747	0.0706	0.0184	-0.7084	-0.2286	-0.2233	0.5275	-0.1222	0.0066	0.0125							
0.8931	0.3344	-0.5217	0.4360	0.6316	0.2410	0.3820	0.0137	0.6144	0.7728	0.1363	-0.3852	0.0752	0.6806	0.4704	-0.3180							
-1.1930	-0.4289	0.2554	-0.4147	0.4102	-1.0681	-0.0773	0.1020	0.6160	0.2122	-0.3237	0.3158	0.4429	0.6459	0.1953	-0.0023							
1.4328	0.2459	-0.0832	-0.6109	0.8845	0.1617	-0.6318	-0.0539	-0.1573	-0.0187	0.4203	0.4195	0.3506	-0.2949	-0.5832	-0.6092							
-1.7185	-0.7971	0.4388	0.3689	-0.5060	-0.2372	-0.1414	0.3061	0.3683	0.1110	0.3511	-0.1607	-0.0665	-0.4861	-0.5828	-0.8088							
<b>b3</b>	<b>iw3_1</b>																					
-0.7449	0.4066	-0.1804	0.7709	0.2136	0.4978	0.6446	0.8798	0.8172	-0.7692	0.3115	0.6484	0.7196	0.3181	-0.3420	0.7976							