



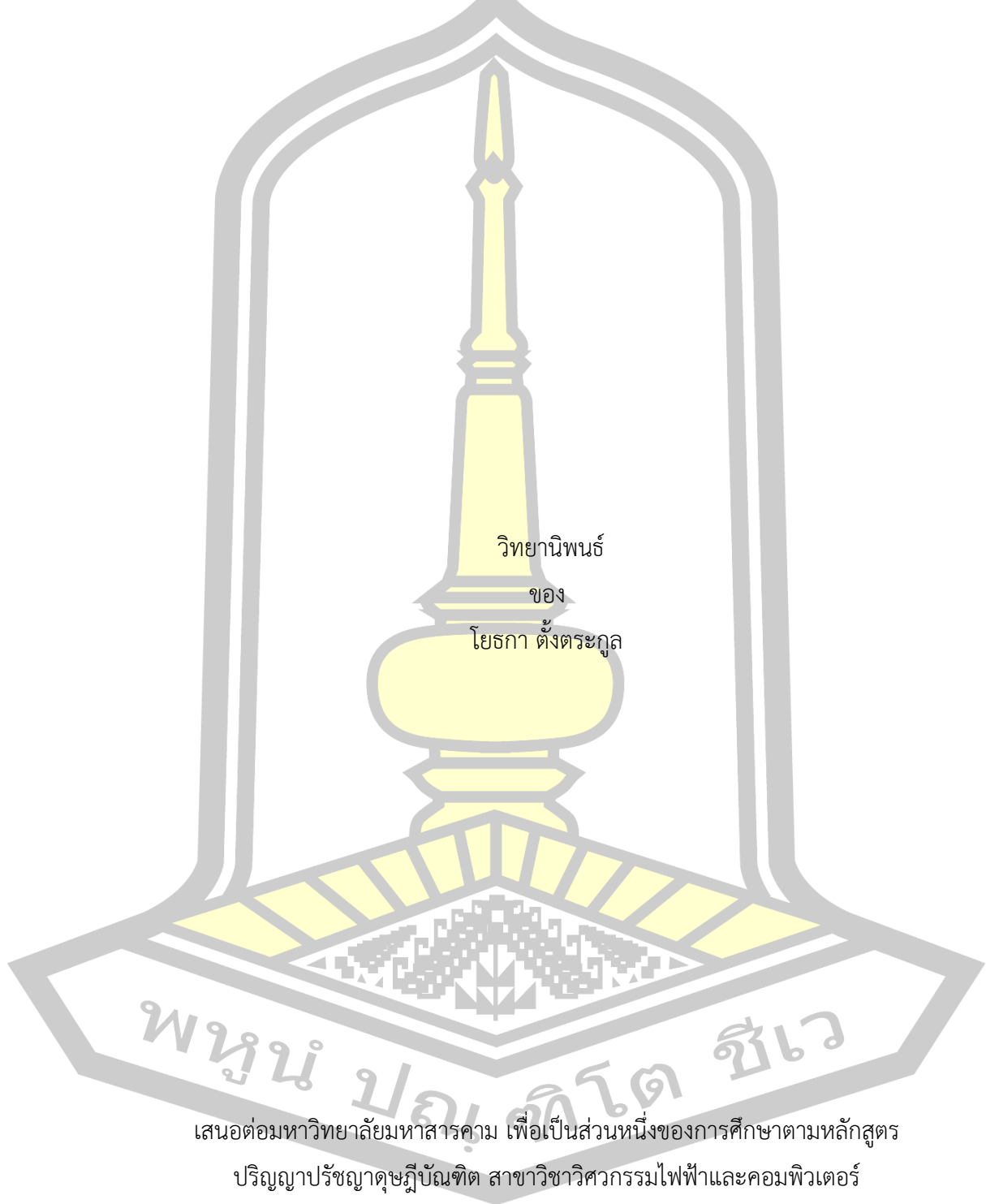
การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิตอลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสม  
ที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฟูงฟ์

วิทยานิพนธ์  
ของ  
โยธกา ตั้งตระกูล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
มกราคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสม  
ที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฟูง์ซิง

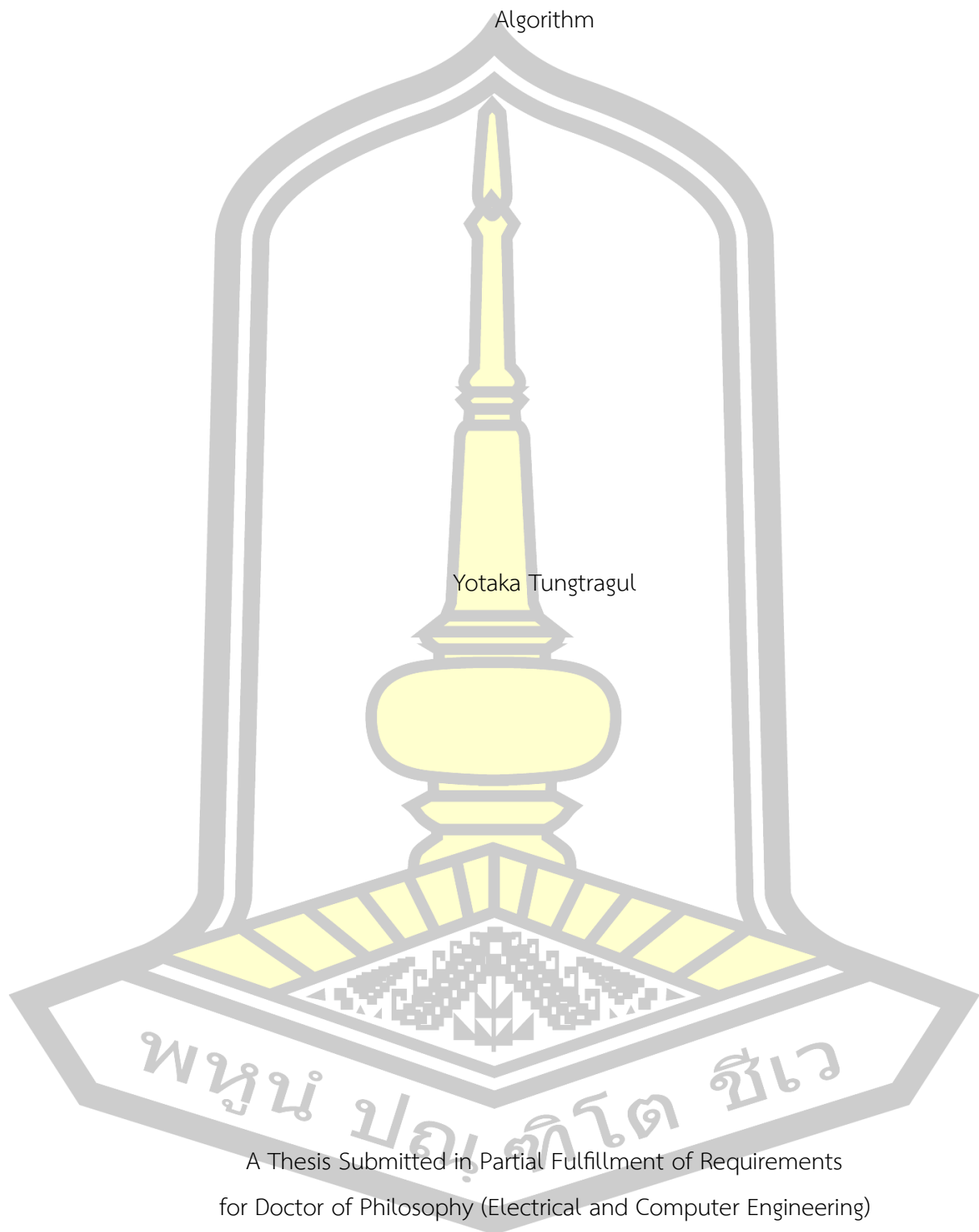


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มกราคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

The Optimal Design of Finite Impulse Response High Pass Filter Using Bee Colony  
Algorithm



Yotaka Tungtragul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

January 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวโยธกา ตั้งตระกูล  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิเศษพันธุ์ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉา สุวรรณทา )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

.....  
(รศ. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....  
(รศ. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

|                  |                                                                                                                |            |                             |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------|
| ชื่อเรื่อง       | การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิตอลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง |            |                             |
| ผู้วิจัย         | โยธกา ตั้งตระกูล                                                                                               |            |                             |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล                                                                           |            |                             |
| ปริญญา           | ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต                                                                                              | สาขาวิชา   | วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ |
| มหาวิทยาลัย      | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                                                                                           | ปีที่พิมพ์ | 2567                        |

### บทคัดย่อ

ตัวกรองความถี่แบบดิจิตอลมีบทบาทสำคัญในด้านการประมวลผลสัญญาณ และเป็นวงจรพื้นฐานด้านโทรคมนาคม ระบบเครื่องมือวัด และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านระบบการสื่อสาร สายอากาศ ระบบควบคุม และทางด้านเครื่องมือแพทย์ ตัวกรองความถี่แบบดิจิตอลได้รับการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยที่การออกแบบจะมีวิธีการที่ต่างกันไป ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วิธีที่ง่ายและเหมาะสมกับการออกแบบตามที่ต้องการ เป้าหมายของการศึกษานี้คือการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิตอลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบตัวกรองความถี่คือ โลบลหลัก (Main lobe) และระดับของโลบรอง (Side lobe) ค่อนข้างกว้าง ปัจจัยการรั่วไหลมีมาก ทำให้เกิดสัญญาณมีความไม่ชัดเจน และมีการสอดแทรกของสัญญาณรบกวนมาก

ดังนั้นผู้เขียนจึงมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหการออกแบบตัวกรองความถี่ที่กล่าวมาข้างต้น ให้มีโลบลหลัก (Main lobe), โลบรอง (Side lobe) มีขนาดลดลง และปัจจัยการรั่วไหลมีค่าลดลง โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ ของโปรแกรม MATLAB โดยนำเสนอเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อค้นหาพารามิเตอร์เบต้าที่เหมาะสมที่สุด และเปรียบเทียบกับเบต้าที่กำหนดผลการจำลองปรากฏให้เห็นว่า เบต้าที่ออกแบบด้วยวิธีฝูงผึ้งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเบต้าที่กำหนดในแง่ของ โลบลหลัก การลดระดับของโลบรอง และปัจจัยการรั่วไหลของสัญญาณ

คำสำคัญ : ตัวกรองความถี่แบบดิจิตอล, การหาค่าที่เหมาะสม, วิธีฝูงผึ้ง, ฟังก์ชันหน้าต่าง

|                   |                                                                                              |              |                                        |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------|
| <b>TITLE</b>      | The Optimal Design of Finite Impulse Response High Pass Filter<br>Using Bee Colony Algorithm |              |                                        |
| <b>AUTHOR</b>     | Yotaka Tuntragul                                                                             |              |                                        |
| <b>ADVISORS</b>   | Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.                                                     |              |                                        |
| <b>DEGREE</b>     | Doctor of Philosophy                                                                         | <b>MAJOR</b> | Electrical and Computer<br>Engineering |
| <b>UNIVERSITY</b> | Maharakham<br>University                                                                     | <b>YEAR</b>  | 2024                                   |

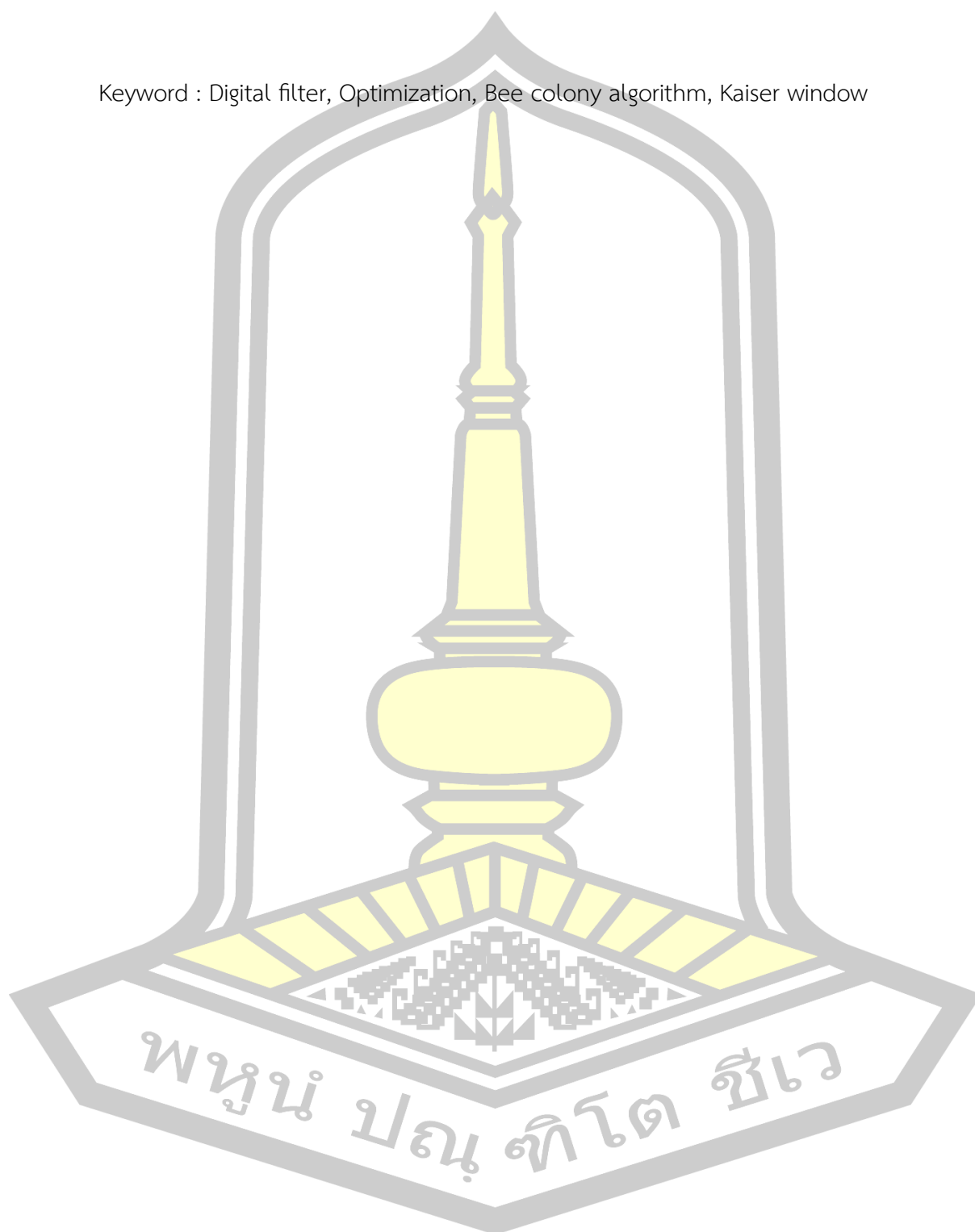
### ABSTRACT

Digital frequency filters play a crucial role in signal processing and are fundamental circuits in telecommunications. They are utilized in various measurement tools and electronic circuits, benefiting communication systems, antennas, control systems, and medical equipment. Digital frequency filters have been continuously invented and developed, and with different design methods available, designers can choose a method that is simple and suitable for the desired design. The goal of this study is to determine the optimal design of a finite impulse response high-pass filter using the Bee Colony Algorithm. However, challenges in designing frequency filters include the main lobe and relatively wide side lobe levels. There is a relatively high level of leakage, leading to unclear signals and considerable interference.

Therefore, this dissertation aims to address the aforementioned design issues of frequency filters by reducing the main lobe and side lobe sizes and decreasing the leakage factor. This will be achieved using the Kaiser window function in the MATLAB program, which presents an optimization technique based on the bee colony method to find suitable parameter values. and when compared to the given beta, simulation results reveal that the beta designed using the bee colony optimization method is more efficient in terms of the main lobe, reducing side lobe

levels, and signal leakage factors.

Keyword : Digital filter, Optimization, Bee colony algorithm, Kaiser window



## กิตติกรรมประกาศ

ดุขฎีนิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้  
ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้จัดทำ

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล อาจารย์ที่ปรึกษาดุขฎี  
นิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้ความช่วยเหลือ ให้แนวคิดความรู้ทางวิชาการ แนะนำแนวทางในการจัดทำดุขฎี  
นิพนธ์ ตรวจสอบดุขฎีนิพนธ์ ทุกขั้นตอน ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำ ซึ่งเป็นผลให้ผู้จัดทำมี  
ความสามารถในการทำและพัฒนาดุขฎีนิพนธ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยงค์ เสริมผล ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ดร. นิวัตร อังควิศิฐพันธ์ และ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา กรรมการสอบปริญา  
นิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แก้ไข ให้แนวคิดต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นสถานที่ในการ  
จัดสร้างการทดสอบและจัดทำดุขฎีนิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พี่น้องและเพื่อนๆ  
ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้จัดทำ ที่ได้ช่วยส่งเสริม  
สนับสนุน กระตุ้นเตือน คอยเอาใจใส่ดูแล ให้กำลังใจและทุนทรัพย์ในการจัดทำดุขฎีนิพนธ์ ด้วยดี ตลอด  
มา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ  
โอกาสนี้

โยธกา ตั้งตระกูล

พูน ปณ จิตโต ชีเว

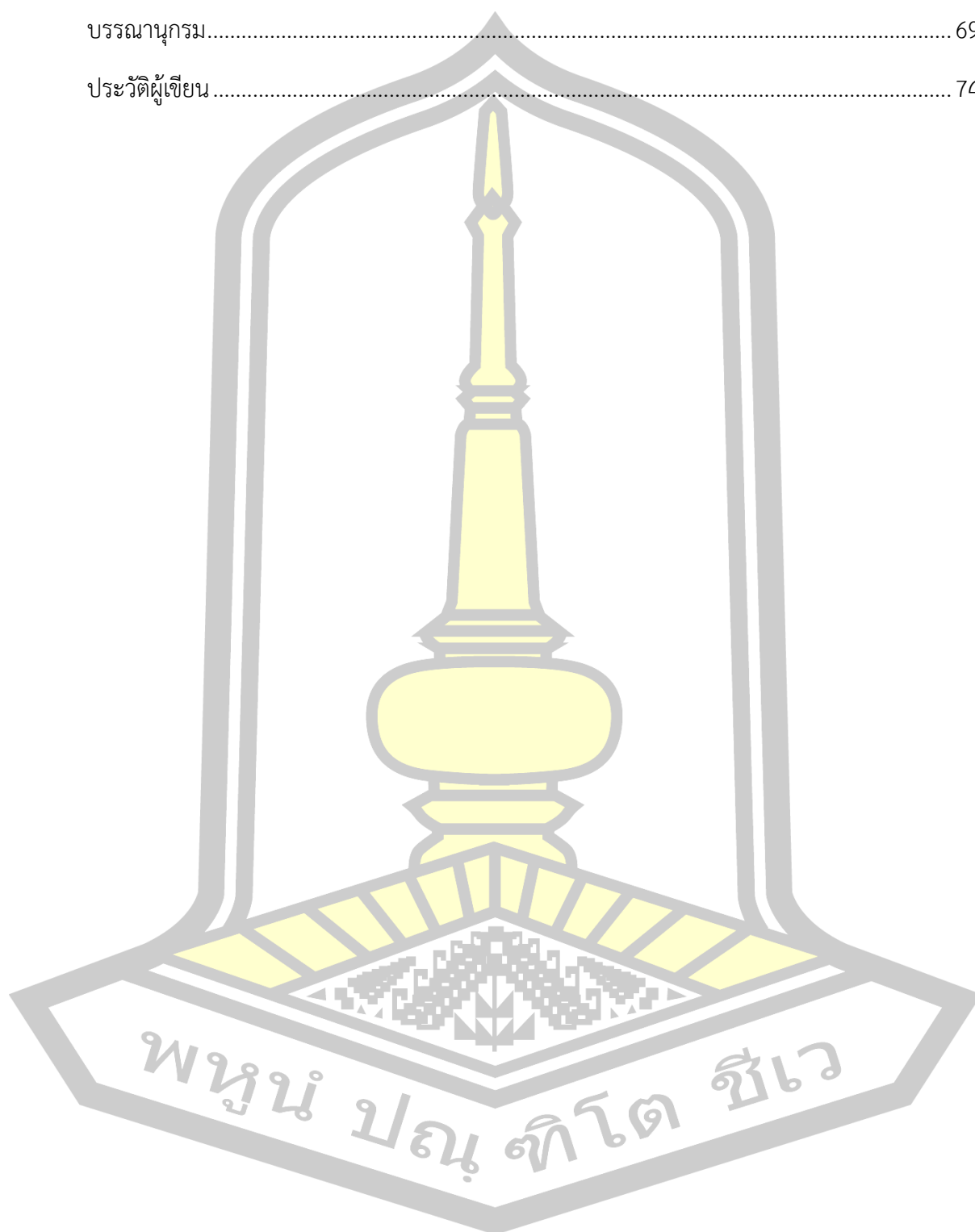


## สารบัญ

|                                                                             | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                        | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                     | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                        | ช    |
| สารบัญ.....                                                                 | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                                            | ฉ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                                           | ฉ    |
| บทที่ 1 บทนำ .....                                                          | 1    |
| 1.1 หลักการและเหตุผล .....                                                  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....                                           | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....                                                 | 2    |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....                                                | 3    |
| บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล .....                                          | 4    |
| 2.1 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล.....                                          | 4    |
| 2.2 โครงสร้างวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล.....                                 | 5    |
| 2.3 ประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล .....                                | 7    |
| 2.3.1 Finite impulse response filter (FIR Filter) .....                     | 7    |
| 2.3.2 Infinite impulse response filter (IIR Filter).....                    | 8    |
| 2.4 ความแตกต่างระหว่าง IIR Filter กับ FIR Filter.....                       | 8    |
| 2.5 หลักการของวงจรกรองความถี่.....                                          | 9    |
| 2.5.3 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter Circuit, LPF).....  | 11   |
| 2.5.4 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (High-pass filter Circuit, HPF)..... | 12   |

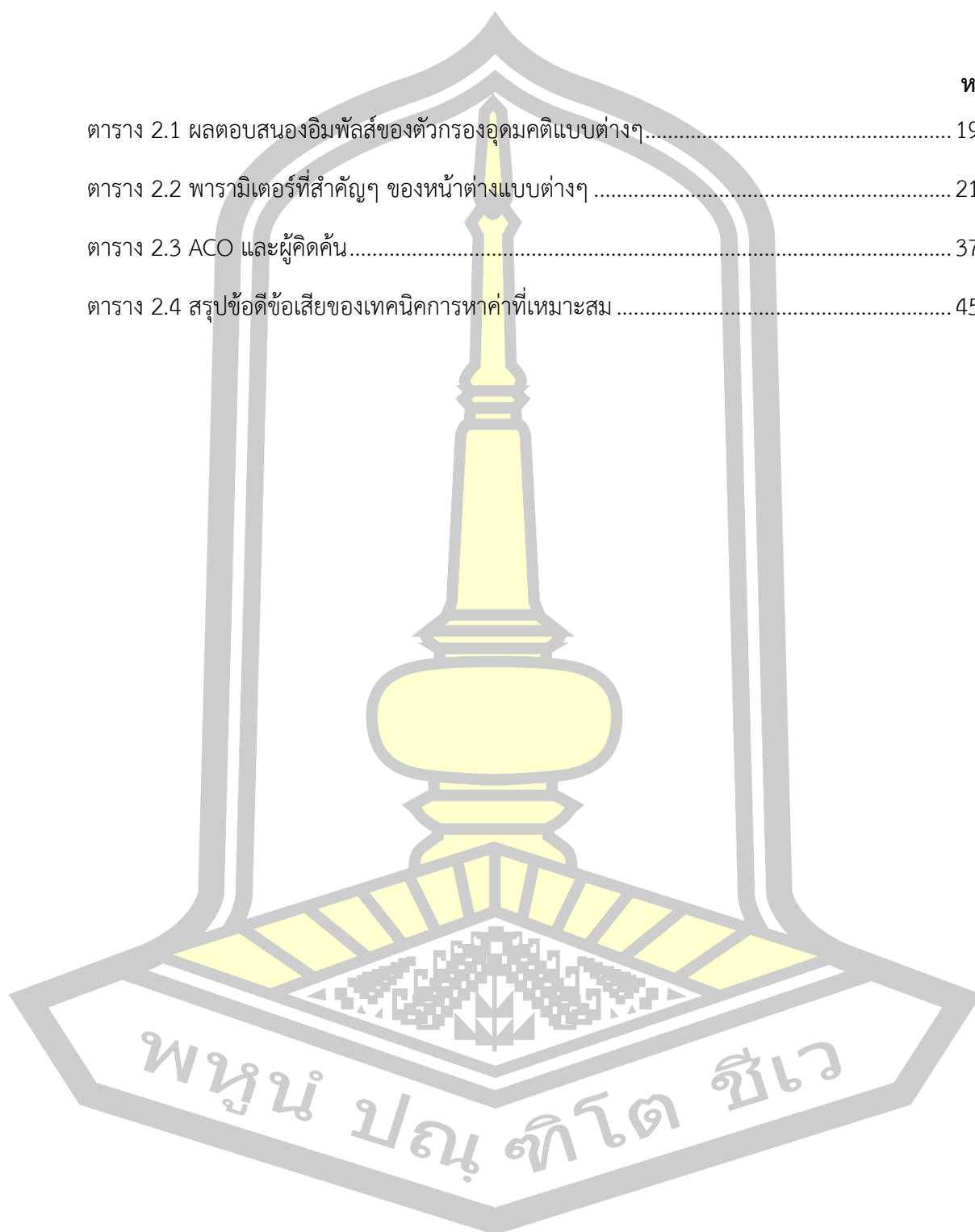
|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.5 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter Circuit, BPF).....             | 13 |
| 2.5.5.1 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band pass filter circuit).....       | 15 |
| 2.6 การออกแบบตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลประเภท FIR.....                                    | 17 |
| 2.6.1 การออกแบบโดยฟังก์ชันหน้าต่าง (Window method).....                                 | 17 |
| 2.7 หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) .....                                               | 21 |
| 2.8 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม .....                                                      | 24 |
| 2.8.1 วิธีเชิงพันธุกรรม ( Genetic Algorithm; GA ) .....                                 | 26 |
| 2.8.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเซวาร์ปัญญาเชิงกลุ่ม (Swarm Intelligent Optimization) ..... | 31 |
| 2.8.3 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO).....                           | 32 |
| 2.8.4 วิธีฝูงมด (Ant Colony Algorithm; ACO).....                                        | 36 |
| 2.8.5 วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm; BA).....                                              | 37 |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                                          | 46 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....                                                     | 49 |
| 3.1 เครื่องมือ และโปรแกรมในการวิจัย.....                                                | 49 |
| 3.2 ขั้นตอนการออกแบบ .....                                                              | 52 |
| 3.3 การเปรียบเทียบกราฟแสดงผลการทดลอง.....                                               | 55 |
| 3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล .....                                                           | 55 |
| 3.5 แผนการดำเนินการและระยะเวลาทำการวิจัย .....                                          | 55 |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....                                                      | 57 |
| 4.1 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....                                      | 57 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....                                                           | 57 |
| บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....                                             | 67 |
| 5.1 สรุปผล.....                                                                         | 67 |
| 5.2 อภิปรายผล.....                                                                      | 67 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 5.3 ข้อเสนอแนะ .....  | 68 |
| บรรณานุกรม.....       | 69 |
| ประวัติผู้เขียน ..... | 74 |



## สารบัญตาราง

|                                                             | หน้า |
|-------------------------------------------------------------|------|
| ตาราง 2.1 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ.....   | 19   |
| ตาราง 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของหน้าต่างแบบต่างๆ .....    | 21   |
| ตาราง 2.3 ACO และผู้คิดค้น.....                             | 37   |
| ตาราง 2.4 สรุปข้อดีข้อเสียของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ..... | 45   |



## สารบัญรูปภาพ

|                                                                                                                          | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพประกอบที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองเชิงเลข .....                                                                   | 4    |
| ภาพประกอบที่ 2.2 องค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ของตัวกรองดิจิทัล .....                                                         | 5    |
| ภาพประกอบที่ 2.3 Diagram ของตัวกระทำพื้นฐานที่เป็นส่วนประกอบของตัวกรองดิจิทัล .....                                      | 6    |
| ภาพประกอบที่ 2.4 Impulse response ของตัวกรองแบบดิจิทัล .....                                                             | 7    |
| ภาพประกอบที่ 2.5 โครงสร้างของวงจรกรองเอฟโออาร์แบบป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียว .....                                          | 7    |
| ภาพประกอบที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรกรองไอโออาร์ทั้งส่วนป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ .....                                     | 8    |
| ภาพประกอบที่ 2.7 ระบบของวงจรกรองความถี่ .....                                                                            | 9    |
| ภาพประกอบที่ 2.8 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter Circuit, LPF) .....                                   | 11   |
| ภาพประกอบที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ใน<br>วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน .....       | 11   |
| ภาพประกอบที่ 2.10 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน .....                                                                 | 12   |
| ภาพประกอบที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ใน<br>วงจรกรองความถี่สูงผ่าน .....      | 13   |
| ภาพประกอบที่ 2.12 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter Circuit, BPF) ....                                  | 13   |
| ภาพประกอบที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองสัญญาณ<br>ช่วงความถี่ .....                | 14   |
| ภาพประกอบที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่<br>เฉพาะช่วงความถี่ช่วงแคบ .....   | 15   |
| ภาพประกอบที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่<br>เฉพาะช่วงความถี่ช่วงกว้าง ..... | 16   |
| ภาพประกอบที่ 2.16 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่<br>หยุดในทางอุดมคติ .....                | 16   |
| ภาพประกอบที่ 2.17 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ .....                                                      | 17   |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบที่ 2.18 ผลตอบสนองตัวกรองความถี่ในอุดมคติ .....                                            | 18 |
| ภาพประกอบที่ 2.19 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่แบบ FIR .....                   | 20 |
| ภาพประกอบที่ 2.20 ตัวอย่างหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาว 50 และพารามิเตอร์ $\beta = 1, 4$ และ 9 ..... | 23 |
| ภาพประกอบที่ 2.21 ตัวอย่างหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาว 101, 20 และ 50 พารามิเตอร์ $\beta=4$ . 23    |    |
| ภาพประกอบที่ 2.22 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบใหม่ ( Modern Optimization Method ) .....                | 25 |
| ภาพประกอบที่ 2.23 ขั้นตอนการดำเนินงานของเชิงพันธุกรรม .....                                         | 27 |
| ภาพประกอบที่ 2.24 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้น จำนวน 4 โครโมโซม .....                               | 28 |
| ภาพประกอบที่ 2.25 แสดงสัดส่วนของค่าฟังก์ชันความเหมาะสมในวงล้อรูเล็ต .....                           | 29 |
| ภาพประกอบที่ 2.26 การข้ามสายพันธุ์ .....                                                            | 30 |
| ภาพประกอบที่ 2.27 การกลายพันธุ์ .....                                                               | 31 |
| ภาพประกอบที่ 2.28 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีกลุ่มอนุภาค .....                                       | 35 |
| ภาพประกอบที่ 2.29 แผนภาพแสดงการเลือกทางเดินที่สั้นที่สุดของมด .....                                 | 36 |
| ภาพประกอบที่ 2.30 ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการหาค่าสูงสุด .....                                  | 39 |
| ภาพประกอบที่ 2.31 ผังสอดแนม $n=10$ ตัว สุ่มหาค่าตอบเริ่มต้น .....                                   | 39 |
| ภาพประกอบที่ 2.32 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผังสอดแนม .....                              | 40 |
| ภาพประกอบที่ 2.33 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี $m=5$ คำตอบ .....                                | 40 |
| ภาพประกอบที่ 2.34 คัดแยกคำตอบออกเป็น 2 กลุ่ม .....                                                  | 41 |
| ภาพประกอบที่ 2.35 กำหนดขอบเขตในการค้นหาวิธีวนรอบๆ .....                                             | 41 |
| ภาพประกอบที่ 2.36 ผังงานค้นหาคำตอบรอบๆ คำตอบ .....                                                  | 42 |
| ภาพประกอบที่ 2.37 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผัง .....                                    | 42 |
| ภาพประกอบที่ 2.38 เลือกคำตอบที่ดีที่สุดในชุดของแต่ละแหล่ง .....                                     | 43 |
| ภาพประกอบที่ 2.39 ผังสอดแนม $n-m=5$ สุ่มหาค่าตอบเริ่มต้นใหม่ .....                                  | 43 |
| ภาพประกอบที่ 2.40 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้ง .....                                           | 44 |

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบที่ 3.41 ตัวกรองความถี่สูง.....                                                                                                                                                              | 51 |
| ภาพประกอบที่ 4.42 การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window).....                                                                                                       | 58 |
| ภาพประกอบที่ 4.43 การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรอง High pass FIR .....                                                                                                                        | 59 |
| ภาพประกอบที่ 4.44 ผลการตอบสนองหน้าต่างไคเซอร์ที่ $\beta=0$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 0.6455, $\beta$ (Bee algorithm) = 1.3248 ที่ filter order=60 .....                                             | 60 |
| ภาพประกอบที่ 4.45 ผลการตอบสนองหน้าต่างไคเซอร์ที่ $\beta = 2$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 2.3468, $\beta$ (Bee algorithm) = 2.5732 ที่ filter order=60.....                                            | 61 |
| ภาพประกอบที่ 4.46 ผลการตอบสนองหน้าต่างไคเซอร์ที่ $\beta = 4$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 4.4224, $\beta$ (Bee algorithm) = 4.7098 ที่ filter order=60.....                                            | 61 |
| ภาพประกอบที่ 4.47 ผลการตอบสนองหน้าต่างไคเซอร์ที่ $\beta = 6$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 6.5418, $\beta$ (Bee algorithm) = 7.0549 ที่ filter order=60.....                                            | 62 |
| ภาพประกอบที่ 4.48 ผลการตอบสนองหน้าต่างไคเซอร์ โดยค่า $\beta$ ที่ดีที่สุดผ่านขั้นตอนวิธีผึ้ง $\beta = 1.3248$ , $\beta = 2.5732$ , $\beta = 4.7098$ และ $\beta = 7.0549$ ที่ filter order = 60... 63   |    |
| ภาพประกอบที่ 4.49 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta = 0$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 0.6455, $\beta$ (Bee algorithm) = 1.3248 ที่ filter order = 60 .....                                       | 64 |
| ภาพประกอบที่ 4.50 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta = 2$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 2.3468, $\beta$ (Bee algorithm) = 2.5732 ที่ filter order=60.....                                          | 64 |
| ภาพประกอบที่ 4.51 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta = 4$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 4.4224, $\beta$ (Bee algorithm) = 4.7098 ที่ filter order = 60 .....                                       | 65 |
| ภาพประกอบที่ 4.52 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta = 6$ , $\beta$ (Bee algorithm) = 6.5418, $\beta$ (Bee algorithm) = 7.0549 ที่ filter order = 60 .....                                       | 65 |
| ภาพประกอบที่ 4.53 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูง โดยค่า $\beta$ ที่ดีที่สุดผ่านขั้นตอนวิธีผึ้ง $\beta = 1.3248$ , $\beta = 2.5732$ , $\beta = 4.7098$ และ $\beta = 7.0549$ ที่ filter order = 60... 66 |    |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

วงจรกรองความถี่ มีประโยชน์ในงานอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม ในด้านการกรองสัญญาณ วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือวงจรกรองความถี่แบบแอนาล็อก และวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล [1] แต่ปัจจุบันได้นิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลเนื่องจากมีความเสถียรภาพที่ดีกว่า [2,16-18] วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลจะแบ่งตามผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ คือผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (IIR) และผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (FIR) วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (FIR) ข้อดีของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (FIR) คือ มีความเสถียร ความผิดเพี้ยนของเฟสน้อย และค่าสัมประสิทธิ์ความไวต่ำ [3-5,10,18,24] การทำงานของวงจรกรองความถี่จะจำแนกตามความต้องการของผู้ใช้ โดยการแบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ได้สี่ประเภทคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน [6-7,14,21,24] วงจรกรองความถี่สูงผ่าน [8-9,11-15,20] วงจรกรองความถี่ผ่าน [8] และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน วิธีการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (FIR) จะมีวิธีการที่แตกต่างกัน ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วิธีที่ง่ายและเหมาะสมกับการออกแบบวงจรตามที่ต้องการ ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบของวงจรกรองความถี่คือโลบหลัก (Main lobe) และการลดทอนของโลบรอง (Side lobe) ค่อนข้างกว้าง ปัจจัยการรั่วไหลมีมากทำให้เกิดสัญญาณมีความไม่ชัดเจน และมีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนมาก โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกโปรแกรม Matlab ฟังก์ชันหน้าต่างในการออกแบบ โดยฟังก์ชันหน้าต่างมีให้เลือกหลายหลายประเภท เช่น หน้าต่าง Hamming, หน้าต่าง Hann, หน้าต่าง Kaiser, หน้าต่าง Blackman และหน้าต่าง Rectangular ฯลฯ [9-11,18-22,26] หน้าต่างที่ถูกเลือกในงานวิจัยนี้คือหน้าต่าง Kaiser โดยทำการพิจารณาจาก ปัจจัยการรั่วไหล, ความกว้างของโลบหลัก และการลดทอนของโลบรอง จากการทดลองพบว่าหน้าต่าง Kaiser ให้ผลที่ดีที่สุด เนื่องจากมีปัจจัยการรั่วไหลน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าต่างอื่นๆ [6-7,9,18,21,26]

ปัจจุบันวงจรกรองความถี่มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงกว่าเมื่อก่อน ส่งผลให้การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลนิยมใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบและวิเคราะห์ โดยมีการนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Technique)



เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการในออกแบบให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบฮิวริสติกมีหลากหลายรูปแบบ เช่น วิธีพันธุกรรมยีนส์ , วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง [17] วิธีกลุ่มอนุภาค [1,8,11-15] วิธีฝูงมด [27-28] วิธีฝูงผึ้ง [29-31] และ วิธีฝูงค้างคาว [24] เป็นต้น

จากการศึกษาค้นคว้าบทความต่างๆ ในวารสารทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ นำเสนอการออกแบบตัวกรองความถี่ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองความเร็วในการบรรจบกันเท่านั้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคฮิวริสติกเชิงวิวัฒนาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ซึ่งยังไม่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหาพารามิเตอร์ตัวกรองความถี่ เป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโลบหลัก (Main lobe) และโลบรอง (Side lobe) ให้มีขนาดลดลง, ปัจจัยการรั่วไหลมีค่าลดลง และมีการตอบสนองขนาดและความเร็วในการบรรจบกัน รวมถึงสามารถพัฒนาสมรรถนะการออกแบบตัวกรองความถี่ให้ดียิ่งขึ้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาในตัวกรองความถี่อื่นๆ ในอนาคตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการทำงานของตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่านโดยเทคนิคการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ด้วยวิธีฝูงผึ้ง
- 1.2.2 ออกแบบตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่านด้วยหน้าต่างโคเชอร์
- 1.2.3 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบวิธีหน้าต่างโดยเทคนิคการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ด้วยวิธีฝูงผึ้ง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลประเภทผลตอบสนองจำนวนจำกัด (Finite Impulse Response)
- 1.3.2 ศึกษาตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่าน (High pass filter)
- 1.3.3 ศึกษาการออกแบบตัวกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่าง (Window Method)
- 1.3.4 ศึกษาเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เรียนรู้และประยุกต์ใช้งานโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการออกแบบตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่านด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

1.4.2 ได้เรียนรู้การออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้กับตัวกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

1.4.3 ได้ผลลัพธ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและออกแบบตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่านด้วยวิธีหน้าต่างไคเซอร์



## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล

กระบวนการดัดแปลงสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งอาจจะต้องเพิ่มค่าหรือลดทอนค่าขนาดของสัญญาณในแถบความถี่ที่กำหนด หรือทำการตัดสัญญาณที่ไม่ต้องการในช่วงความถี่ที่กำหนดออกไป ซึ่งทำให้สามารถแยกสัญญาณในช่วงความถี่ที่ต้องการได้ ในการวิเคราะห์วงจรนั้น ต้องใช้เครื่องมือพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย เรียกว่าวงจรกรองความถี่เชิงเลข วงจรกรองความถี่เชิงเลขมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยข้อได้มีเปรียบหลายประการดังนี้

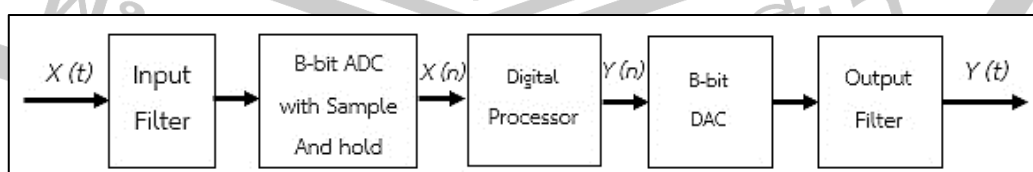
2.1.1 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ สามารถออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้ และการออกแบบวงจรกรองความถี่สามารถตอบสนองเชิงเส้นได้

2.1.2 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบ จะไม่คลาดเคลื่อนไปตามสภาพแวดล้อมหรืออุณหภูมิ และระยะเวลาในการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานในย่านความถี่ต่ำได้เป็นอย่างดี

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรกรองความถี่แบบปรับความถี่ (Adaptive Filter) ทำได้ง่าย

2.1.4 ผู้ออกแบบสามารถออกแบบโดยคำนึงถึงความยาวของคำ (Word length) ของเลขฐานสองที่ต้องการใช้ และยังสามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้

2.1.5 เมื่อพิจารณาในมุมความเสถียรของวงจรกรองความถี่ ความเชื่อถือได้ ในปัจจุบันสิ่งเหล่านี้กำลังได้รับการพัฒนา และปรับปรุง โดยให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น และประสิทธิภาพดีกว่าวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (Analog Filter) เรียกว่าวงจรกรองความถี่แบบอุปมาน วงจรกรองความถี่เชิงเลขสามารถเขียนอธิบายในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้

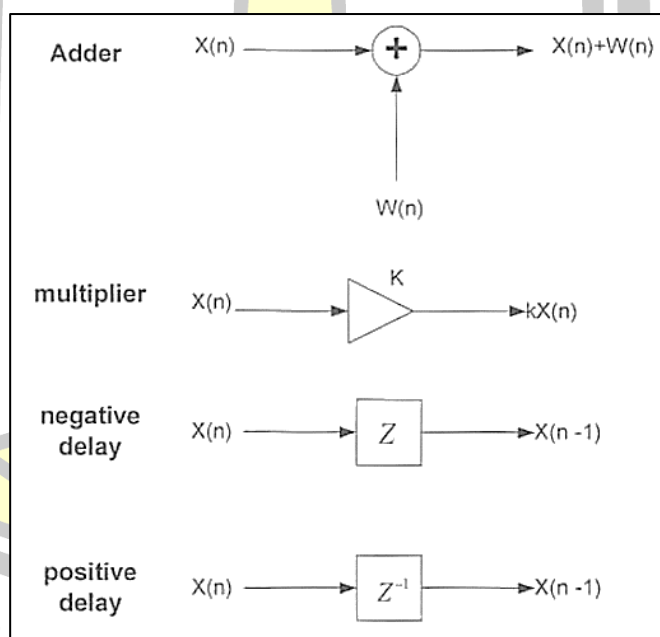


ภาพประกอบที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองเชิงเลข

โดยสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกจะถูกสุ่มด้วยช่วงเวลาที่ยกที่ และสัญญาณที่ถูกสุ่มนี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเลขฐานสอง โดยการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณเชิงเลข (analog to digital converter) จากนั้นเลขฐานสองที่แทนด้วยสัญญาณอนาล็อก ที่เข้ามาทางอินพุตจะถูกกรองโดยวงจรกรองความถี่เชิงเลข การกรองจะเป็นการคำนวณทางตัวเลข ซึ่งจะอาศัยวงจรที่ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ ได้แก่ การบวก การคูณ รีจิสเตอร์ และอุปกรณ์หน่วยความจำต่างๆ

## 2.2 โครงสร้างวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล

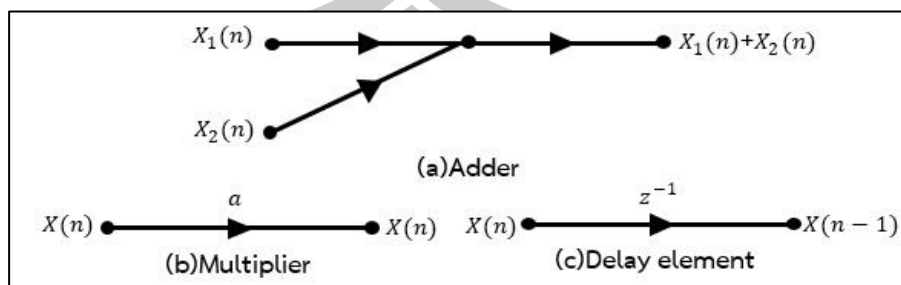
วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล ประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ การบวก (Adder), การคูณ (Multiplier) และ การหน่วง (Unit Delay) เวลาแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 การบวก และการคูณจะใช้แนวคิดมาจากตัวเลขในหน่วยคอมพิวเตอร์



ภาพประกอบที่ 2.2 องค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ของตัวกรองดิจิทัล

การหน่วงเวลาของตัวกรองดิจิทัลแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ บวก (Positive) และลบ (Negative) โดยการหน่วงแบบบวกเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่บันทึกความจำของรีจิสเตอร์ (Register) จะเก็บค่าได้ตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อการคำนวณครั้งต่อไป การหน่วงแบบบวกจะแทนค่าด้วย

$Z^{-1}$  การหวนรูปแบบลบใช้แทนค่าต่อในระดับสัญญาณ แทนค่าด้วย  $Z$  จะมีชนิด และการใช้งานที่เหมาะสม สามารถเขียนเป็น Diagram ได้ดังนี้



ภาพประกอบที่ 2.3 Diagram ของตัวกระทำพื้นฐานที่เป็นส่วนประกอบของตัวกรองดิจิทัล

ข้อดีของตัวกรองแบบดิจิทัลมีอยู่ด้วยกันหลายประการ

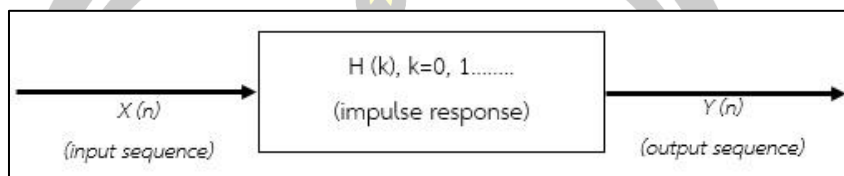
- 1) ตัวกรองแบบดิจิทัลมีความเที่ยงตรงสูงโดยเฉพาะการใช้งานที่ความถี่ต่ำ
- 2) ตัวกรองแบบดิจิทัลแบบ FIR มีผลการตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น (Linear phase response)
- 3) ผลการตอบสนองความถี่ (Frequency response) ของตัวกรองแบบดิจิทัลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วย software โดยไม่มีการแก้ไข hardware ใดๆทั้งสิ้น
- 4) ในปัจจุบันเทคโนโลยีของ VLSI ก้าวหน้ามากขึ้นและได้มีการนำมาสร้างตัวกรองแบบดิจิทัล ทำให้ขนาดของวงจรเล็กลงและมีความเร็วในการทำงานสูงขึ้น
- 5) สภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ มีผลต่อการทำงานของตัวกรองแบบดิจิทัลน้อยมาก
- 6) ตัวกรองแบบดิจิทัล เป็นการประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัลดังนั้นในการเก็บหรือบันทึกข้อมูลสามารถทำได้ง่าย
- 7) ตัวกรองแบบดิจิทัลสามารถออกแบบให้มีจำนวน order สูงๆได้

ข้อเสียของดิจิทัลฟิลเตอร์

- 1) ตัวกรองแบบดิจิทัลทำงานที่ความถี่สูงได้ไม่ดี
- 2) ออกแบบยากเพราะต้องใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงเป็นส่วนร่วมในการออกแบบ
- 3) ต้องใช้เวลาพอสมควรในการสร้าง hardware ของตัวกรองแบบดิจิทัล

## 2.3 ประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล

ตัวกรองแบบดิจิทัลแบ่งได้ 2 ชนิดคือ Finite impulse response filter (FIR Filter) และ Infinite impulse response filter (IIR Filter) ตัวกรองแบบดิจิทัลทั้งสองชนิดสามารถแสดงให้เห็นในลักษณะของ Impulse response ได้ดังภาพประกอบที่ 2.4

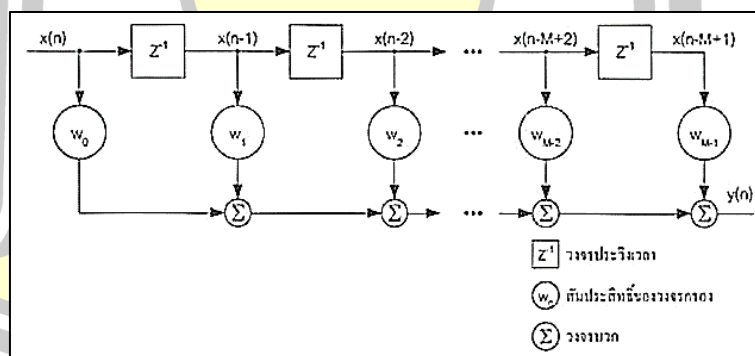


ภาพประกอบที่ 2.4 Impulse response ของตัวกรองแบบดิจิทัล

### 2.3.1 Finite impulse response filter (FIR Filter)

วงจรกรองเอพ็ไอราร์ เป็นวงจรกรองที่ผลลัพธ์ของวงจร  $y(n)$  ขึ้นกับข้อมูลขาเข้า  $x(n)$  และอดีตในช่วงเวลาจำกัด ( $M$ ) เท่านั้น ข้อมูลในอดีตที่นานกว่านั้นจะไม่มีผลใดๆ ต่อผลลัพธ์เลย ผลตอบสนองของวงจรเขียนได้เป็น

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} w_i x(n-i) \quad (2.1)$$



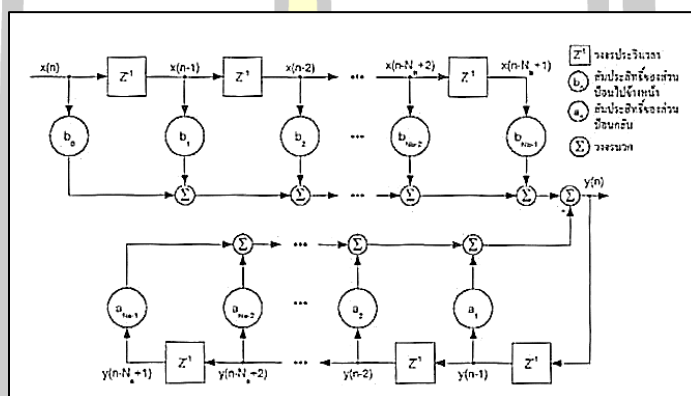
ภาพประกอบที่ 2.5 โครงสร้างของวงจรกรองเอพ็ไอราร์แบบป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียว

จากสมการที่ 2.1 และโครงสร้างของวงจรกรองเอพ็ไอราร์ดังภาพประกอบที่ 2.5 จะเห็นว่าผลลัพธ์เกิดจากผลรวมของผลคูณระหว่างข้อมูลขาเข้าในอดีต  $x(n-i)$  กับค่าสัมประสิทธิ์  $w_i$  โดยที่  $i=0, \dots, M-1$  และวงจรกรองมีโครงสร้างป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียวนั้น

### 2.3.2 Infinite impulse response filter (IIR Filter)

วงจรกรองไอโออาร์ เป็นวงจรกรองที่ข้อมูลขาออก ขึ้นกับทั้งข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออก ทำให้เสมือนว่าผลตอบสนองของวงจรขึ้นกับข้อมูลขาเข้าทั้งหมด วงจรกรองประเภทนี้จะมีโครงสร้างทั้งแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับ ดังแสดงภาพประกอบที่ 2.6 ผลตอบสนองของวงจรเขียนได้เป็น

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N_b-1} b_i x(n-i) - \sum_{j=1}^{N_a-1} a_j y(n-j) \quad (2.2)$$



ภาพประกอบที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรกรองไอโออาร์ทั้งส่วนป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ

วงจรกรองไอโออาร์มีข้อดีคือมีผลตอบบิมพัลส์ที่นานกว่าวงจรกรองเอฟไออาร์หากมีจำนวนพารามิเตอร์เท่ากัน แต่วงจรกรองไอโออาร์มีเสถียรภาพด้อยกว่าและความทนทานต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่าวงจรกรองเอฟไออาร์

## 2.4 ความแตกต่างระหว่าง IIR Filter กับ FIR Filter

2.4.1 ตัวกรอง FIR มีผลตอบสนองทางเฟสแบบเชิงเส้น (Linear phase response) ซึ่งเป็นข้อดีของตัวกรองชนิดนี้ เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางเช่น Data Transmission, biomedicine, digital audio และ processing แต่ด้านตัวกรอง IIR ให้ผลตอบสนองทางเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear phase response)

2.4.2 ตัวกรอง FIR จะมีความเสถียรเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบ Non recursively หรือ ถ้านำ Transfer Function  $H(z)$  ของตัวกรอง FIR ไป plot ลงใน Z-plane จะพบว่าบน Z-plane จะมี Pole อยู่ที่ Origin

2.4.3 ในการดำเนินงาน ตัวกรอง IIR มีโอกาสที่จะเกิด Round-off noise และ Coefficient quantization error มากกว่าตัวกรอง FIR

2.4.4 ตัวกรอง FIR จะทำงานได้อย่างเที่ยงตรงไม่ว่าจะการใช้การประมวลผลแบบ Fix-point หรือ Floating-point ส่วนตัวกรอง IIR จะทำงานได้อย่างเที่ยงตรงถ้าใช้ตัวประมวลผลแบบ Floating-point แต่ถ้าใช้ตัวประมวลผลแบบ Fix-point ก็สามารถทำงานได้แต่จะไม่เที่ยงตรงนัก

## 2.5 หลักการของวงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่ เป็นวงจรที่มีบทบาทสำคัญในด้านวิศวกรรมไฟฟ้ามากมาย และเป็นวงจรที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารโทรคมนาคมต่างๆ เช่น ในระบบการกระจายเสียง (broadcasting systems) ระบบดาวเทียมสื่อสาร (satellite systems) เป็นต้น วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท

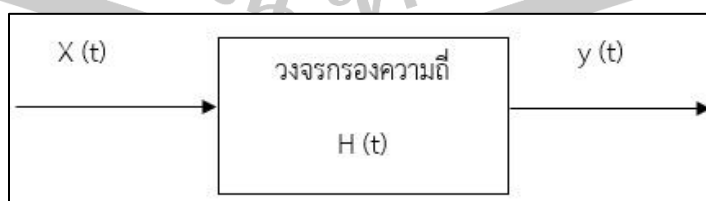
2.5.1 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (digital signals) หรือสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signals)

2.5.2 วงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (analog filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่อยู่กับสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา (continuous-time signals) โดยวงจรกรองแบบแอนะล็อกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.5.2.1 วงจรกรองความถี่ประเภทพาสซีฟ (passive filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างจากอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ขดลวดตัวนำ และตัวต้านทานหรือสร้างมาจากตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ

2.5.2.2 วงจรกรองความถี่ประเภทแอคทีฟ (active filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ เช่น ออปแอมป์ OTA วงจรสายพานกระแส ฯลฯ ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ เป็นต้น

หลักการโดยทั่วไปของวงจรกรองความถี่ โดยทั่วไปสมการการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกที่มีรูปแบบของสมการการถ่ายโอนของวงจรเป็นแบบไบควอด (biquadratic function) เป็นหลัก ระบบของวงจรกรองความถี่สามารถเขียนแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2.7



ภาพประกอบที่ 2.7 ระบบของวงจรกรองความถี่



เมื่อ  $x(t)$  คือ สัญญาณทางด้านขาเข้า

$y(t)$  คือ สัญญาณทางด้านขาออก

และ  $h(t)$  คือ สัญญาณตอบสนองต่อสัญญาณแบบอิมพัลส์ (impulse response) ของระบบ ซึ่งถ้าให้วงจรกรองความถี่ภายใต้การพิจารณาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นแบบคอซอล (casal) เป็นแบบเชิงเส้น (linear) และเป็นระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant) แล้ว  $y(t)$  จะสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-r)x(r)dr \quad (2.3)$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซของสมการที่ (2.3) จะได้ผลการแปลงคือ

$$y(s) = H(s)x(s) \quad (2.4)$$

โดย  $Y(s)$ ,  $X(s)$  และ  $H(s)$  คือผลการแปลงลาปลาซของ  $y(t)$ ,  $x(t)$  และ  $h(t)$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาบนแกนความถี่  $s = j\omega$  สมการที่ (2.4) สามารถเขียนแสดงอยู่ในรูปส่วนประกอบของขนาดและเฟสได้ดังนี้

$$|Y(s)| = |H(s)||X(s)| \quad (2.5)$$

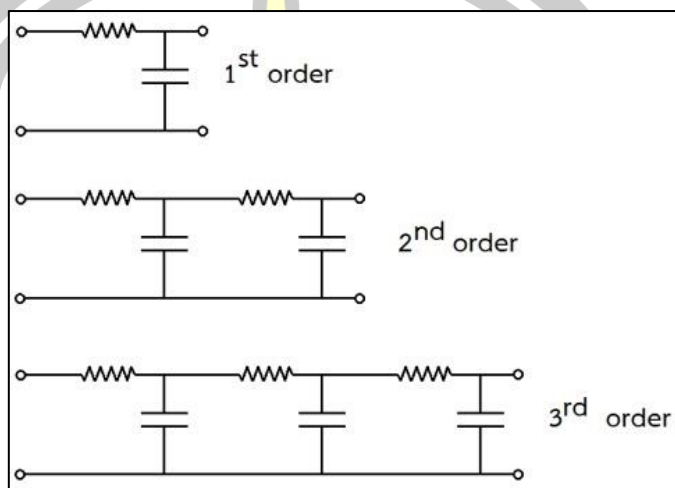
$$\phi_{r(j\omega)} = \phi_{H(j\omega)} + \phi_{X(j\omega)} \quad (2.6)$$

โดย  $\phi_{r(j\omega)}$  คือค่าเฟสของ  $Y(j\omega)$ ,  $\phi_{H(j\omega)}$  คือค่าเฟสของ  $H(j\omega)$  และ  $\phi_{X(j\omega)}$  คือค่าเฟสของ  $X(j\omega)$

โดยทั่วไปวงจรกรองความถี่ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณที่ต้องการ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือสัญญาณวิทยุ ซึ่งสัญญาณที่ส่งมาจากทางด้านสถานีส่งนั้นจะเป็นสัญญาณที่มาจากทุกๆ สถานีที่ทำการกระจายเสียงรวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นขณะทำการกระจายเสียง การปรับค่าความถี่เพื่อฟังรายการจากสถานีใดๆ สถานีหนึ่งนั้นจะทำได้โดยการกรองเอาสัญญาณของสถานีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการฟังรวมทั้งสัญญาณรบกวนออกให้เหลือเพียงสัญญาณของสถานีที่ต้องการจะรับฟังเท่านั้น ในช่วงของแถบความถี่ที่ต่างกันของวงจร ทำให้สามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภทตามคุณลักษณะของแถบหยุดและแถบผ่านของวงจร

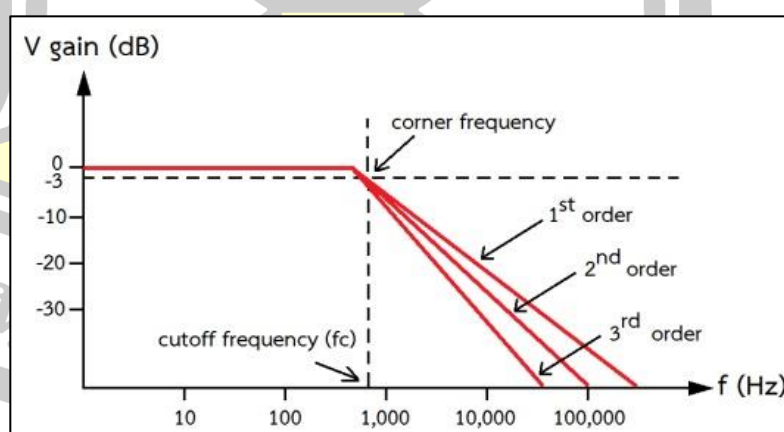
### 2.5.3 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter Circuit, LPF)

เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนด ผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่สูงกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ ดังภาพประกอบที่ 2.9



ภาพประกอบที่ 2.8 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter Circuit, LPF)

จากภาพประกอบที่ 2.8 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังภาพประกอบที่ 2.9



ภาพประกอบที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (Cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter, LPF) สามารถทำได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$W_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.7)$$

โดย  $W_c$  คือ ความถี่ตัดเชิงมุม มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที (rad/s)

$f_c$  คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

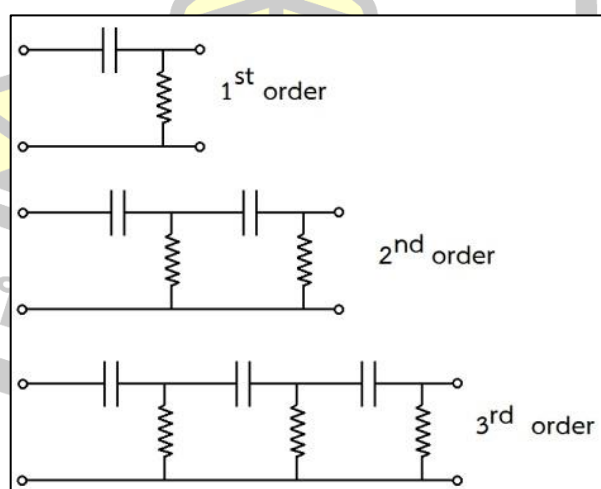
$R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )

$C$  คือ ความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึงความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency)  $f_c$  ในขณะที่ช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟจะเป็นช่วงความถี่แถบหยุดของวงจร ในกรณีเช่นนี้ค่าแบนด์วิธ (Bandwidth) ของวงจรมีค่าเท่ากับ  $f_c$  เราจะพบว่าการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในแบบอุดมคติ

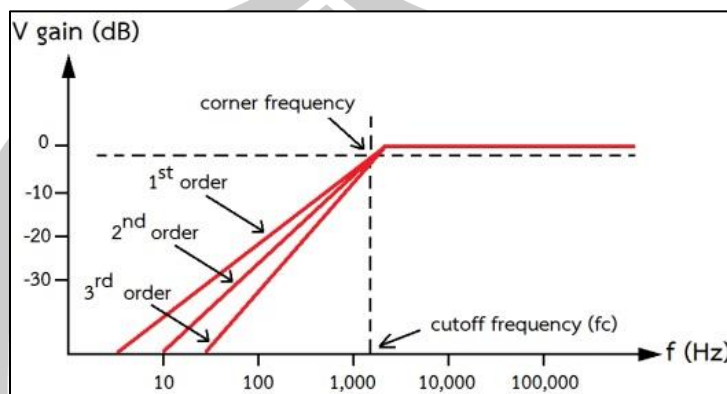
#### 2.5.4 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (High-pass filter Circuit, HPF)

เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่ต่ำกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ดังภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.10 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน  
(High-pass filter Circuit, HPF)

จากภาพประกอบ 2.10 สัญญาณไฟฟ้าเกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังภาพประกอบที่ 2.11



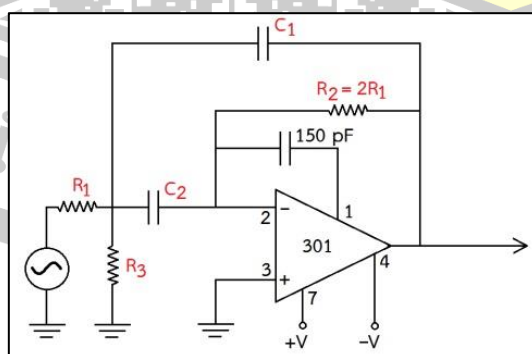
ภาพประกอบที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่  
ลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

การคำนวณหาความถี่ตัด (Cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high pass filter, HPF) สามารถทำได้โดยใช้หลักการเดียวกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน นั่นคือคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.7

วงจรกรองความถี่สูงผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงความถี่ต่ำระหว่าง 0 และความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) ขณะที่วงจรจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟผ่านไปได้

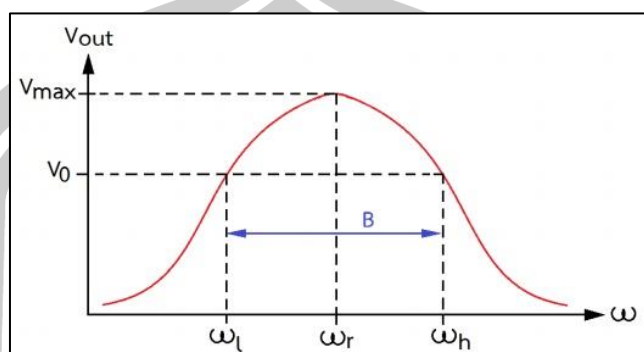
#### 2.5.5 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter Circuit, BPF)

เป็นวงจรที่ยอมให้ช่วงสัญญาณความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยความถี่ที่ไม่ได้อยู่ในช่วงกำหนดจะถูกลดทอนจนหมดไป ซึ่งเสมือนกับการนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และ วงจรกรองความถี่สูงผ่านต่อร่วมกัน ดังภาพประกอบที่ 2.12



ภาพประกอบที่ 2.12 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน  
(Band-pass filter Circuit, BPF)

จากภาพประกอบที่ 2.12 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ ดังภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจร  
กรองสัญญาณช่วงความถี่

จากภาพประกอบ 2.13 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{max}$ ) จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงความถี่ เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency,  $\omega$ ) ส่วนตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าลดลง ( $V_0$ ) มี 2 ความถี่ คือ ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เรียกว่า higher cutoff frequency ใช้สัญลักษณ์  $\omega_h$  และ ความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ เรียกว่า lower cutoff frequency ใช้สัญลักษณ์  $\omega_l$  ซึ่งช่วงผลต่างระหว่าง  $\omega_h$  และ  $\omega_l$  เรียกว่า แบนวิธ (bandwidth,  $B$ ) โดย  $B = \omega_h - \omega_l$  อัตราส่วนระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับแบนวิธ เรียกว่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor,  $Q$ ) หรือ  $Q$  factor ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกความถี่ ค่าตัวประกอบคุณภาพนี้ไม่มีหน่วย โดยถ้าค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูง วงจรจะสามารถเลือกความถี่ได้ดีมากยิ่งขึ้น ดังนี้

- 1) ความถี่ช่วงแคบ (narrow band) จะมีค่า  $B < 0.01$  และ  $Q > 10$
- 2) ความถี่ช่วงกว้าง (wide band) จะมีค่า  $B > 0.01$  และ  $Q < 10$

ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่สามารถคำนวณหาตัวประกอบคุณภาพ ( $Q$  factor) ของวงจรได้จากค่าแบนวิธของวงจรมานั้นๆ ดังสมการดังนี้

$$Q = \frac{\omega_r}{B} \quad (2.8)$$

วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านของวงจรอยู่ในช่วงระหว่างความถี่คutoffของความถี่ คือ  $\omega_l$  ในขณะที่แถบหยุดของวงจรจะมี 2 แถบคือ

ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คัทออฟ  $\omega_l$  และในช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟ  $\omega_h$  สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในอุดมคติ

#### 2.5.5.1 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band pass filter circuit)

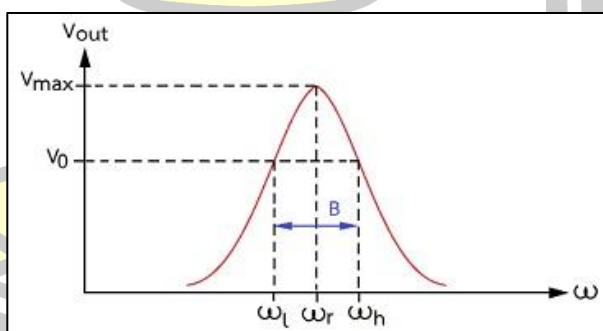
การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามภาพประกอบ 2.14 แต่ต้องกำหนดค่าแบนวิธ (B) ที่ต้องการรวมถึงค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) จากสมการที่ 2.8 จากนั้นคำนวณหาค่าอุปกรณ์อื่นๆ โดยกำหนดให้  $C_1 = C_2 = C$  ให้มีค่าที่เหมาะสม และคำนวณหาค่าความต้านทานต่างๆในวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_2 = \frac{2}{BC} \quad (2.9)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} \quad (2.10)$$

$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} \quad (2.11)$$

สัญญาณที่ออกมาจากวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่แคบ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังภาพประกอบที่ 2.14

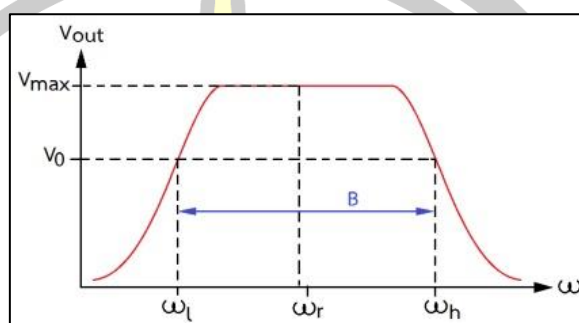


ภาพประกอบที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงแคบ

#### 2.5.5.2 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (Wide Band Pass Filter Circuit)

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (Wide Band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามภาพประกอบที่ 2.15 เช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่

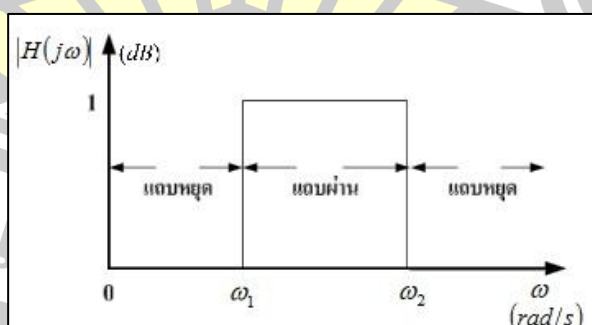
เฉพาะช่วงแคบ แต่จะเลือกให้ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) มีค่าน้อยกว่า 10 โดยการออกแบบ นอกจากนั้น จะเหมือนกับวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบทุกประการ สัญญาณที่ออกมาจาก วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้างนี้ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังภาพประกอบที่ 2.15



ภาพประกอบที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ ความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงกว้าง

#### 2.5.6 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด (Band-stop filter)

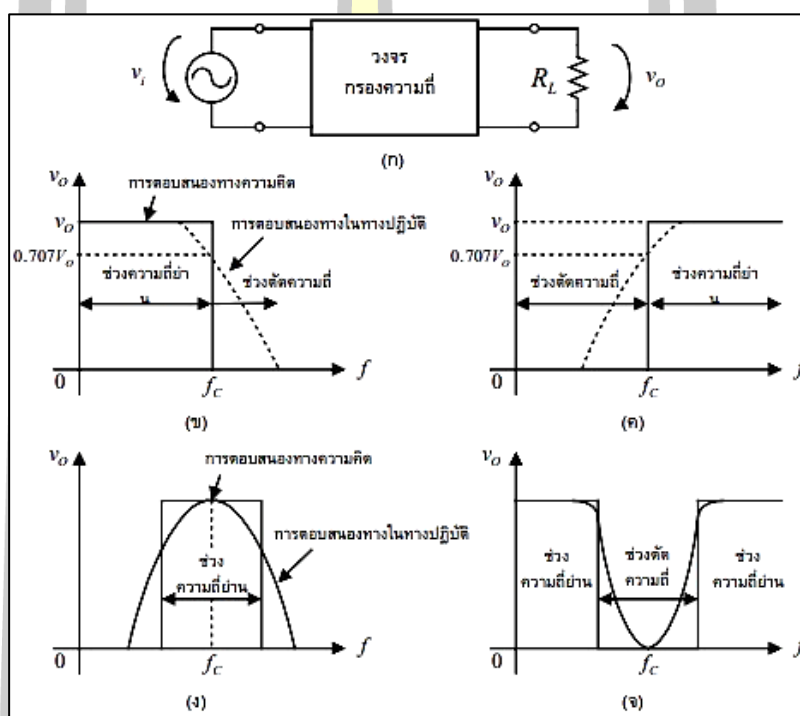
วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วง ระหว่างความถี่คutoff 2 ความถี่คือ  $\omega_1$  และ  $\omega_u$  ( $\omega_u > \omega_1$ ) ในขณะที่แถบความถี่ผ่านของวงจรจะมี อยู่ 2 แถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คutoff ( $\omega_1$ ) และในช่วงของความถี่ที่สูงกว่า ความถี่คutoff ( $\omega_u$ ) สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบ ความถี่หยุดในแบบอุดมคติแสดงดังภาพประกอบที่ 2.16



ภาพประกอบที่ 2.16 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจร กรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในทางอุดมคติ

วงจรกรองความถี่ที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ตามอุดมคติไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นคงใช้วงจรที่มีผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ประมาณคล้ายกับผลตอบสนองในอุดมคติมาปฏิบัติการ วงจรทางปฏิบัติเบื้องต้นแบบง่ายๆ คือ วงจรกรองความถี่ชนิดที่เรียกว่าวงจรกรองความถี่แบบไบพอด

หน้าที่ในการทำงานของวงจรกรองความถี่ สามารถจำแนกตามความต้องการของผู้ใช้ได้ โดยจะแบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ (frequency response) ดังภาพประกอบที่ 2.17



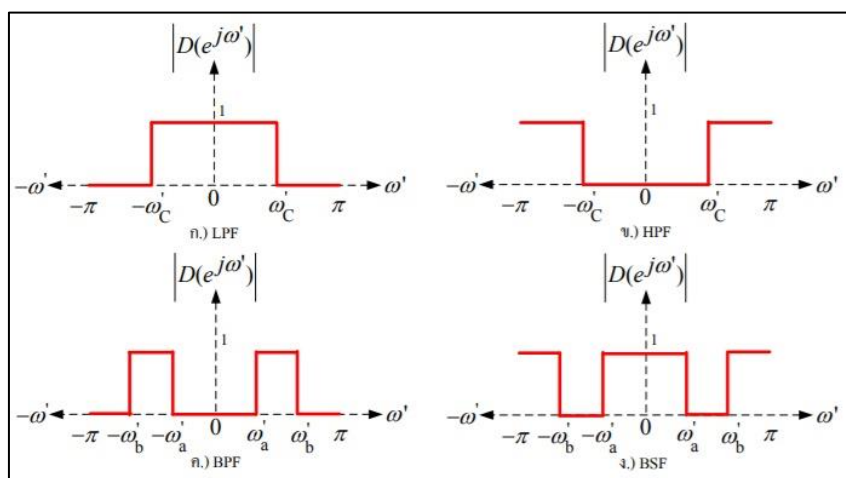
ภาพประกอบที่ 2.17 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ

## 2.6 การออกแบบตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลประเภท FIR

### 2.6.1 การออกแบบโดยฟังก์ชันหน้าต่าง (Window method)

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่โดยใช้วิธีหน้าต่าง เป็นวิธีพื้นฐานโดยมีสิ่งที่สำคัญคือการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ต้นแบบ ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.18





ภาพประกอบที่ 2.18 ผลตอบสนองตัวกรองความถี่ในอุดมคติ

จากภาพประกอบ 2.18 จะสมมติให้  $d(n)$  แทนเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์และกำหนดให้  $D(e^{j\omega'})$  แทนผลตอบสนองเชิงความถี่สำหรับตัวกรองความถี่ในอุดมคติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังที่ได้แสดงภาพประกอบที่ 2.18 (ก) เราจะหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติได้โดยใช้เทคนิคของการแปลงฟูริเยร์แบบเวลาไม่ต่อเนื่องชนิดผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform : IDTFT) ตัวอย่างเช่นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านดังนี้

$$d(n) = IDTFT\{D\} \quad (2.12)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (1) e^{j\omega n} d\omega \quad (2.13)$$

$$= \left[ \frac{e^{j\omega n}}{2\pi j n} \right]_{-\pi}^{\pi} = \frac{e^{j\pi n} - e^{-j\pi n}}{2\pi j n} \quad (2.14)$$

$$= \frac{\sin(\pi n)}{\pi n}; -\infty < n < \infty \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 จะพบปัญหาที่  $n = 0$  เพราะผลตอบสนองต่ออิมพัลส์  $d(n)$  มีค่าเป็นเศษส่วนด้วยศูนย์ วิธีแก้ไขปัญหามาค่า  $d(0)$  ได้โดยใช้ทฤษฎีของลิมิตดังต่อไปนี้

$$d(0) = \frac{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\sin(w_c n))}{d(n)}}{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\pi n)}{dn}} = \frac{w_c}{\pi} \quad (2.16)$$

สำหรับวงจรกรองความถี่แบบอื่นสามารถหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์  $d(n)$  ได้โดยการแปลง IDTFT เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองนั้นๆ ได้ดังตาราง 2.1 เพื่อใช้ในการออกแบบ

ตาราง 2.1 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ

| ชนิดของตัวกรอง         | $D(n), -\infty < n < \infty$                          | $D(n), n = 0$                                          |
|------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน | $\frac{\sin(w_c n)}{\pi n}$                           | $\frac{w_c}{\pi}$                                      |
| วงจรกรองความถี่สูงผ่าน | $\delta(n) - \frac{\sin(w_c n)}{\pi n}$               | $1 - \frac{w_c}{\pi}$                                  |
| วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน | $\frac{\sin(w_b n) - \sin(w_a n)}{\pi n}$             | $\frac{w_b}{\pi} - \frac{w_a}{\pi}$                    |
| วงจรแถบความถี่หยุดผ่าน | $\delta(n) - \frac{\sin(w_b n) - \sin(w_a n)}{\pi n}$ | $1 - \left( \frac{w_b}{\pi} + \frac{w_a}{\pi} \right)$ |

ในตารางข้างต้นเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์  $d(n)$  ของวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ โดยวิธีการแปลง IDTFT ผู้ที่ต้องการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางคณิตศาสตร์มาก เพราะการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ เราจะใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ในตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการหาผลตอบสนองอิมพัลส์  $d(n)$  ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยวิธีการแปลงจาก IDTFT ที่  $n$  มีค่า  $-\infty < n < \infty$  กับที่  $n=0$  ตามลำดับ การออกแบบจะต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญตามลักษณะเฉพาะของวิธีหน้าต่าง เช่น ความถี่ตัด, อัตราการลดทอน, ความพลັงหรือริบเบิลของแถบผ่าน และความกว้างของแถบเปลี่ยน

ความถี่ตัด (cutoff frequency ;  $C_f$ ) คือจุดตัดของความถี่ที่ให้สัญญาณผ่านหรือไม่ผ่าน ไปยังขั้วออกของวงจรกรองความถี่สำหรับวงจรกรองความถี่ของ FIR กำหนดค่าความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 นิยามนี้แตกต่างกับแบบ IIR ที่ใช้นิยามเดียวกันกับวงจรกรองแบบแอนาล็อกคือที่ขนาดลดลงประมาณ 0.707

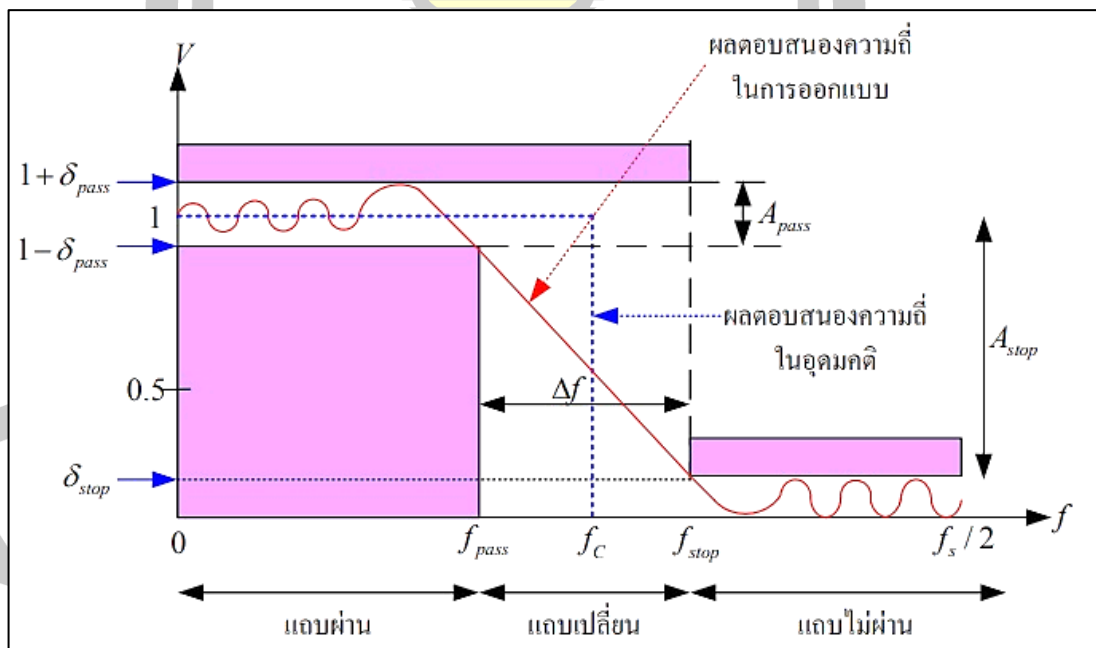
การลดทอนของแถบหยุด (stop-band attenuation;  $A_{stop}$ ) คือจำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลงวัดค่าเป็น dB โดยการลดทอนของแถบหยุดมีความสัมพันธ์กับความพลีวของแถบหยุด ตามภาพประกอบที่ 2.19 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A_{stop} = 20 \log \delta_{stop} \quad (2.17)$$

ความพริ้วหรือริบเบิลของแถบผ่าน (pass-band ripple ;  $\delta_{pass}$ ) คือค่าสูงสุดที่ขนาดแถบผ่าน แกว่งออกจากค่า 1 ตามภาพประกอบที่ 2.19 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A_{pass} = 20 \log \left( \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \right) \quad (2.22)$$

ความกว้างของแถบเปลี่ยน (transition band width ;  $\Delta f$ ) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดเทียบกับช่วงความถี่



ภาพประกอบที่ 2.19 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่แบบ FIR

ตาราง 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของหน้าต่างแบบต่างๆ

| หน้าต่าง    | $\delta_{pass}$ | $A_{stop}$<br>$= 20 \log \delta_{stop}$ | $\Delta f$                    | $W(n), n = 0, 1, \dots, N-1$<br>$\left(M = \frac{N-1}{2}\right)$                                 |
|-------------|-----------------|-----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rectangular | 8.9%            | 21                                      | $\frac{2}{N}$                 | 1                                                                                                |
| Hanning     | 0.63%           | 44                                      | $\frac{4}{N}$                 | $0.5 - 0.5 \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right)$                                               |
| Hamming     | 0.22%           | 53                                      | $\frac{4}{N}$                 | $0.42 - 0.5 \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) - 0.8 \cos \left( \frac{4\pi n}{N-1} \right)$ |
| Blackman    | 0.02%           | 74                                      | $\frac{6}{N}$                 | $0.42 - 0.5 \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) - 0.8 \cos \left( \frac{4\pi n}{N-1} \right)$ |
| Kaiser      | ปรับได้         | ปรับได้                                 | $\frac{A - 7.95}{14.36(N-1)}$ | $\frac{I_0 \sqrt{\frac{\alpha^2 - (n-M)^2}{M^2}}}{I_0(\alpha)}$                                  |

### 2.6.2 การออกแบบโดยวิธีสุ่มความถี่ (Frequency Sampling Method)

วิธีสุ่มความถี่เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวกรองที่มีรูปร่างของผลตอบสนองเชิงความถี่แปลกไปจากปกติ โดยวิธีนี้จะระบุตัวอย่างของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการเป็นข้อกำหนดเริ่มต้นของการออกแบบ หลักการของการหาสัมประสิทธิ์สำหรับตัวกรองที่มีเฟสเชิงเส้นที่สมมาตรชนิดที่ 1 เป็นต้น

สมมติว่า  $|D(e^{j\omega})|$  คือผลตอบสนองทางขนาดที่ต้องการ ซึ่งอาจจะมีรูปร่างใดก็ได้ และเป็นฟังก์ชันของ  $\omega$  การที่จะได้ตัวกรองสุดท้ายที่มีเฟสเชิงเส้น เฟสระบบจะต้องเท่ากับ  $-\omega M$  โดยที่  $M = \frac{N-1}{2}$  จะได้ผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการดังนี้

$$D(e^{j\omega}) = e^{-j\omega M} |D(e^{j\omega})| \quad (2.23)$$

### 2.7 หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

หน้าต่าง Kaiser หรือที่เรียกว่าหน้าต่าง Kaiser-Bessel ได้รับการพัฒนาโดย James Kaiser ที่ Bell Laboratories เป็นตระกูลฟังก์ชันหน้าต่าง ที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองการตอบสนองแรงกระตุ้นที่จำกัด และการวิเคราะห์สเปกตรัม หน้าต่าง Kaiser ใกล้เคียงกับหน้าต่าง

DPSS ซึ่งเพิ่มความเข้มข้นของพลังงานในกลีบหลัก แต่คำนวณได้ยาก หน้าต่าง Kaiser และการแปลงฟูรีเยร์กำหนดโดย:

$$w_0(x) \triangleq \begin{cases} \frac{1}{L} \frac{I_0 \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^2} \right]}{I_0[\pi\alpha]}, & |x| \leq L/2 \\ 0, & |x| > L/2 \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\frac{\sin \left( \sqrt{(\pi L f)^2 - (\pi \alpha)^2} \right)}{I_0(\pi \alpha) \cdot \sqrt{(\pi L f)^2 - (\pi \alpha)^2}} \quad (2.25)$$

กำหนดให้  $I_0$  เป็นฟังก์ชัน Bessel ลำดับที่ 0 เป็นศูนย์ของชนิดแรก

$L$  เป็นระยะเวลาของหน้าต่าง

$\alpha$  เป็นจำนวนจริงที่ไม่ติดลบซึ่งกำหนดรูปร่างของหน้าต่างในโดเมนความถี่ จะ

กำหนดการแลกเปลี่ยนระหว่างความกว้างของกลีบหลักและระดับของกลีบข้าง ซึ่งเป็นการตัดสินใจที่สำคัญในการออกแบบหน้าต่างบางครั้งหน้าต่าง Kaiser จะถูกพารามิเตอร์โดย  $\beta$  โดยที่  $\beta = \pi\alpha$  สำหรับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ฟังก์ชันสามารถสุ่มตัวอย่างแบบสมมาตรได้ดังนี้:

$$w[n] = L \cdot w_0 \left( \frac{L}{N} \left( n - \frac{N}{2} \right) = \frac{I_0 \left[ \pi \alpha \sqrt{1 - \left( \frac{2n}{N} - 1 \right)^2} \right]}{I_0[\pi\alpha]}, 0 \leq n \leq N, \right) \quad (2.26)$$

โดยที่ความยาวของหน้าต่างคือ  $N+1$  และ  $N$  อาจเป็นเลขคู่หรือเลขคี่ก็ได้ (ดูรายการฟังก์ชันหน้าต่าง)

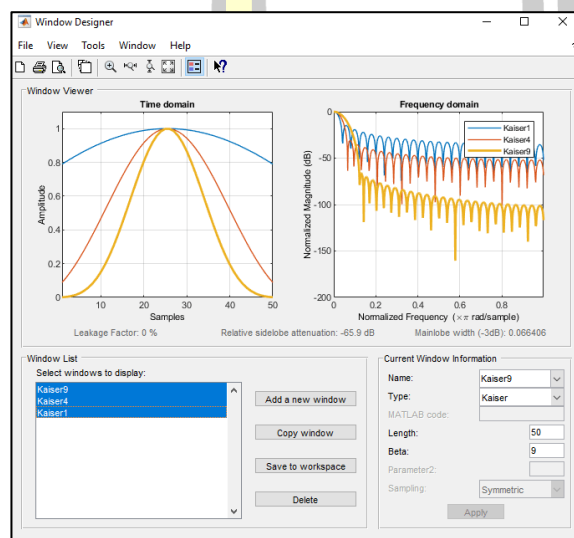
ในการแปลงฟูรีเยร์ ค่า Null แรกหลังจากกลีบหลักเกิดขึ้นที่  $f = \frac{\sqrt{1+\alpha^2}}{L}$ , ซึ่งเป็นเพียง  $\sqrt{1+\alpha^2}$  มีหน่วยเป็น  $N$  (DFT "bins") เมื่อ  $\alpha$  เพิ่มขึ้น กลีบหลักจะมีความกว้างเพิ่มขึ้น และกลีบข้างจะมีความกว้างลดลง  $\alpha = 0$  ตรงกับหน้าต่างสี่เหลี่ยม สำหรับ  $\alpha$  ขนาดใหญ่ รูปร่างของหน้าต่าง Kaiser (ทั้งในโดเมนเวลาและความถี่) มีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นโค้ง หน้าต่าง Kaiser เกือบจะเหมาะสมที่สุดในแง่ของความเข้มข้นสูงสุดที่รอบความถี่ 0

หน้าต่าง Kaiser เป็นค่าประมาณของหน้าต่าง ซึ่งอัตราส่วนของพลังงานของกลีบหลักต่อพลังงานของกลีบข้างถูกขยายให้ใหญ่ สำหรับหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาวเฉพาะ พารามิเตอร์  $\beta$  จะควบคุมการลดทอนกลีบข้างสัมพัทธ์ สำหรับ  $\beta$  ที่กำหนด การลดทอนกลีบข้างสัมพัทธ์ได้รับการ

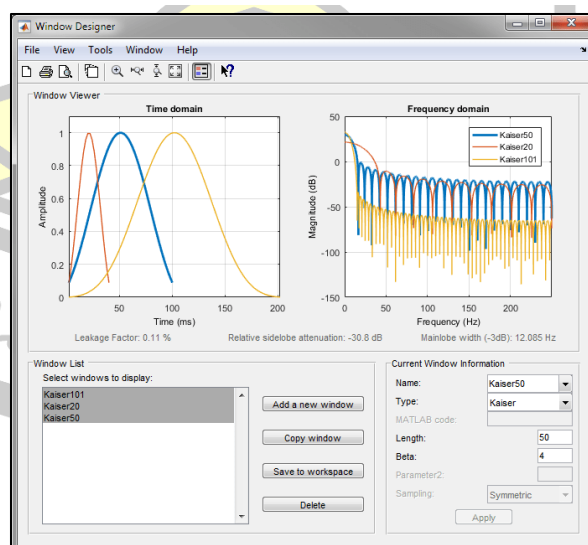
แก้ไขตามความยาวของหน้าต่าง คำสั่ง  $\text{kaiser}(n, \beta)$  คำนวณความยาว  $n$  หน้าต่าง Kaiser พร้อมพารามิเตอร์เบต้า

เมื่อ  $\beta$  เพิ่มขึ้น การลดทอนกิลิปข้างสัมพันธ์จะลดลงและความกว้างของกิลิปหลักเพิ่มขึ้น ภาพหน้าจอนี้แสดงให้เห็นว่าการลดทอนกิลิปข้างสัมพันธ์ยังคงเหมือนเดิม สำหรับพารามิเตอร์  $\beta$  คงที่ เนื่องจากความยาวแตกต่างกัน

ตัวอย่างของหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาว 50 และพารามิเตอร์  $\beta$  ของ 1, 4 และ 9 แสดงอยู่ในตัวอย่างนี้



ภาพประกอบที่ 2.20 ตัวอย่างหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาว 50 และพารามิเตอร์  $\beta = 1, 4$  และ 9



ภาพประกอบที่ 2.21 ตัวอย่างหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาว 101, 20 และ 50 พารามิเตอร์  $\beta=4$

มีสูตรการออกแบบสองสูตรที่สามารถช่วยคุณออกแบบตัวกรอง FIR เพื่อให้ตรงตามชุดข้อกำหนดตัวกรองโดยใช้หน้าต่าง Kaiser เพื่อให้ได้การลดทอนกิลิปข้างสัมผัสของ  $-\alpha$  dB พารามิเตอร์  $\beta$  (เบต้า) คือ

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(\alpha - 8.7), & \alpha > 50 \\ 0.5842(\alpha - 21)^{0.4} + 0.07886(\alpha - 21), & 21 \leq \alpha \leq 50 \\ 0, & \alpha < 21 \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} & \alpha > 50 \\ & 21 \leq \alpha \leq 50 \\ & \alpha < 21 \end{aligned} \quad (2.28)$$

สำหรับความกว้าง (Filter order) การเปลี่ยนแปลงของ  $\Delta\omega$  rad/ตัวอย่าง, ให้ใช้ความยาว

$$n = \frac{\alpha - 8}{2.285 \Delta\omega} + 1 \quad (2.29)$$

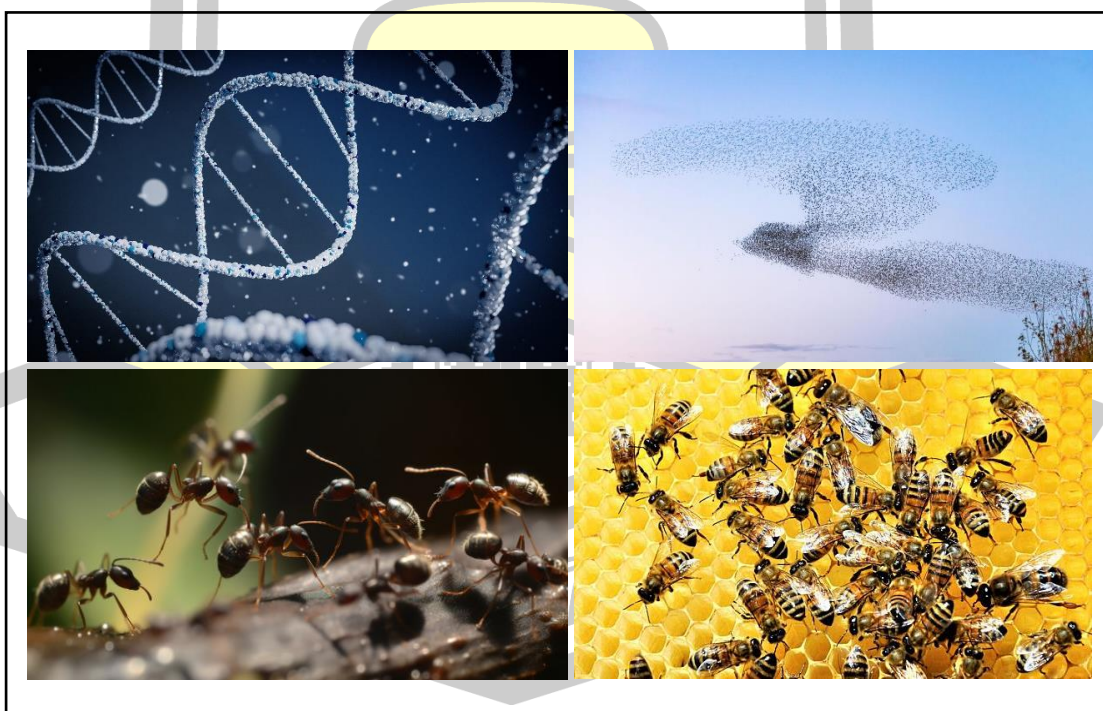
ฟังก์ชัน kaiser จะประเมินลำดับการกรอง ความถี่คัตออฟ และพารามิเตอร์เบต้าของหน้าต่าง Kaiser ที่จำเป็นเพื่อให้ตรงตามชุดข้อกำหนดเฉพาะของโดเมนความถี่ที่กำหนด

## 2.8 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสม เกิดขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุด ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มาจากหลักพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ เมื่อปี ค.ศ.1940 วิธีที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่มีหลายตัวแปรนั้น มีไม่มากนัก เช่น การทำ Least Square ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านฟิสิกส์บางประเภท แต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่รู้จักกันคือการทำ Newton Method วิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้กับปัญหาของระบบที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางเคมี ต่อมาในช่วงปี ค.ศ.1940 - ค.ศ.1950 มีการแนะนำสาขาใหม่ทางการหาค่าที่เหมาะสมที่เรียกว่ากำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) จากนั้นได้มีการศึกษา และพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบันได้มีการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมมาใช้กันอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น การทำการหาค่าที่เหมาะสมกลายมาเป็นสิ่งสำคัญในทุกๆ



สาขาวิชาโดยเฉพาะทางด้านเศรษฐศาสตร์ จึงทำให้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีการนำหลักการของการหาค่าที่เหมาะสมมาช่วยในเรื่องของเงินทุน และผลกำไร เช่น การลดต้นทุน, การผลิต, การเพิ่มผลผลิต เป็นต้น สำหรับด้านอื่นๆ เช่น สาขาทางด้านการบินและอวกาศ มีการใช้หลักการของการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อหาเส้นทางการบินจากโลกไปที่ดวงจันทร์ และกลับลงมายังโลกอีกครั้งโดยใช้เชื้อเพลิงให้น้อยที่สุด หรือการหาโครงสร้างของเครื่องบินที่มีมวลน้อยที่สุด เป็นต้น สำหรับในงานภาคอุตสาหกรรมนั้น การตัดสินใจที่จะปรับปรุงให้ได้สิ่งที่ดีที่สุดเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้ง ตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิต, การลดค่าใช้จ่ายในการบวนการต่างๆ ซึ่งผู้จัดการต้องมีการทำงานที่ดีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ให้ได้ตามที่ต้องการ และในทางเดียวกันด้านวิศวกรต้องออกแบบระบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นแต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยลง บางปัญหากลายเป็นเรื่องยุ่งยากเมื่อวิศวกรพบกับทางเลือกมากมายในการแก้ปัญหาเหล่านี้ และจะอย่างไรถึงสามารถเลือกวิธีที่ดีที่สุดให้ได้ผลลัพธ์ตามความต้องการ และดีที่สุด การพัฒนาเทคนิคในการหาค่าที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันเรียกว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบใหม่ ( Modern Optimization Method ) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่มีแบบแผน ( Nontraditional ) และได้มีการนำวิธีนี้เข้าไปร่วมกับสาขาวิชาทางด้านพันธุศาสตร์ เช่น วิธีพันธุกรรม, วิธีกลุ่มอนุภาค, วิธีฝูงมด และ วิธีฝูงผึ้ง เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 2.22 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบใหม่ ( Modern Optimization Method )



### 2.8.1 วิธีเชิงพันธุกรรม ( Genetic Algorithm; GA )

John Holland ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีเชิงพันธุกรรมในปี ค.ศ.1975 ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีทั้งคุณลักษณะที่ดีและไม่ดี ซึ่งคุณลักษณะที่ดีย่อมมีโอกาสอยู่รอดและจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดพันธุกรรมไปยังรุ่นลูกหลานได้มากกว่า เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตรุ่นใหม่มีคุณลักษณะที่ดีขึ้น สำหรับเชิงพันธุกรรม เมื่อนำมาใช้กับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ( Optimization problem ) อาศัยหลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรม เพื่อให้ได้คำตอบในรุ่น (Generation) ต่อไป ให้ค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีขึ้น ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับแล้วว่า เชิงพันธุกรรมเป็นวิธีที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งได้ประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาในสาขาต่างๆ มากมาย

#### 2.8.1.1 หลักการพื้นฐานของเชิงพันธุกรรม

เชิงพันธุกรรมจะนำเสนอข้อมูลหรือคำตอบในรูปของโครโมโซม (Chromosome) ในแต่ละโครโมโซม จะประกอบด้วยบิต (bit) เรียกว่า ยีน (Gene) โดยจะทำการคัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมจากกลุ่มของโครโมโซมทั้งหมด และนำโครโมโซมเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการคัดเลือกที่เลียนแบบกระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม เพื่อหาโครโมโซมที่มีความเหมาะสมในการอยู่รอด โดยใช้ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ที่สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ขั้นตอนการเชิงพันธุกรรมมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างประชากรเริ่มต้นในรูปของโครโมโซม โดยการสุ่มเลือกจากประชากรต้นแบบ

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของแต่ละโครโมโซม

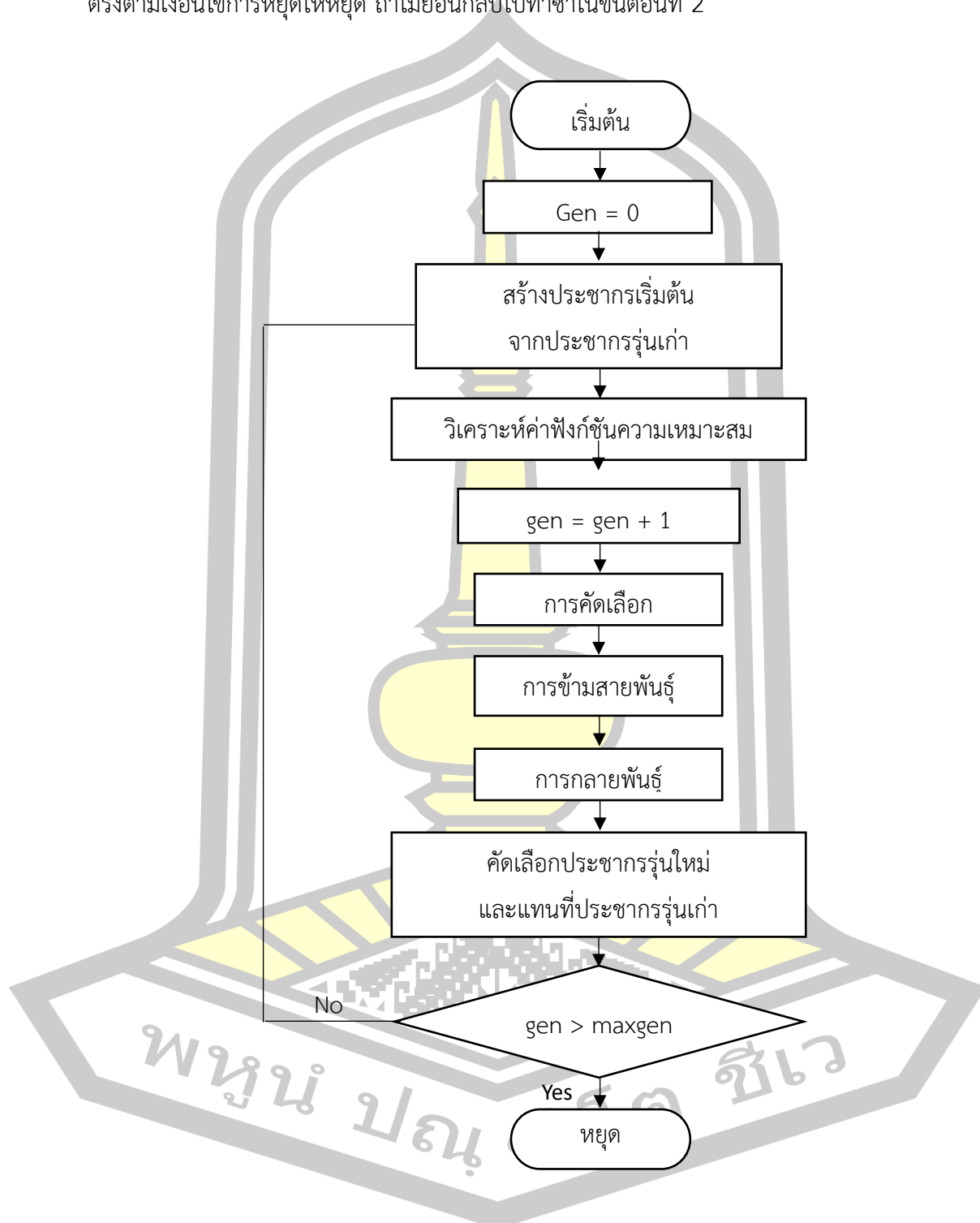
ขั้นตอนที่ 3 การคัดเลือก (Re-production) อ้างอิงจากค่าฟังก์ชันความเหมาะสม โดยพิจารณาว่าโครโมโซมในมีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดี จะถูกกำหนดน้ำหนักความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกแต่ละครั้งสูง

ขั้นตอนที่ 4 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) ทำโดยการกำหนดค่าสุ่มให้แก่โครโมโซมที่ถูกเลือกมาทั้งหมด โครโมโซมใดที่มีค่าสุ่มน้อยกว่าความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์ จะถูกนำไปจับคู่โครโมโซมพ่อแม่ แล้วมีการแลกเปลี่ยนบางส่วนของโครโมโซมทั้งสองเพื่อสร้างโครโมโซมรุ่นลูก

ขั้นตอนที่ 5 การกลายพันธุ์ (Mutation) ทำโดยการเปลี่ยนค่าของโครโมโซมบางตำแหน่งเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ ตามอัตราความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์

ขั้นตอนที่ 6 แทนที่ประชากร (Replacement) ประชากรรุ่นใหม่ เป็นชุดโครโมโซมลูกที่เกิดจากขั้นตอนวิวัฒนาการต่างๆ ข้างต้น จะถูกนำไปแทนที่ประชากรรุ่นก่อนหน้าและถูกนำไปเข้ากระบวนการวิวัฒนาการใหม่ โดยกระบวนการต่างๆ จะถูกปฏิบัติซ้ำๆ จนกระทั่งถึงรุ่นที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 7 เพิ่มจำนวนของรุ่น ( $gen = gen + 1$ ) และตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไขการหยุดให้หยุด ถ้าไม่ย้อนกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2



ภาพประกอบที่ 2.23 ขั้นตอนการดำเนินงานของเชิงพันธุกรรม

### 2.8.1.2 องค์ประกอบของเชิงพันธุกรรม

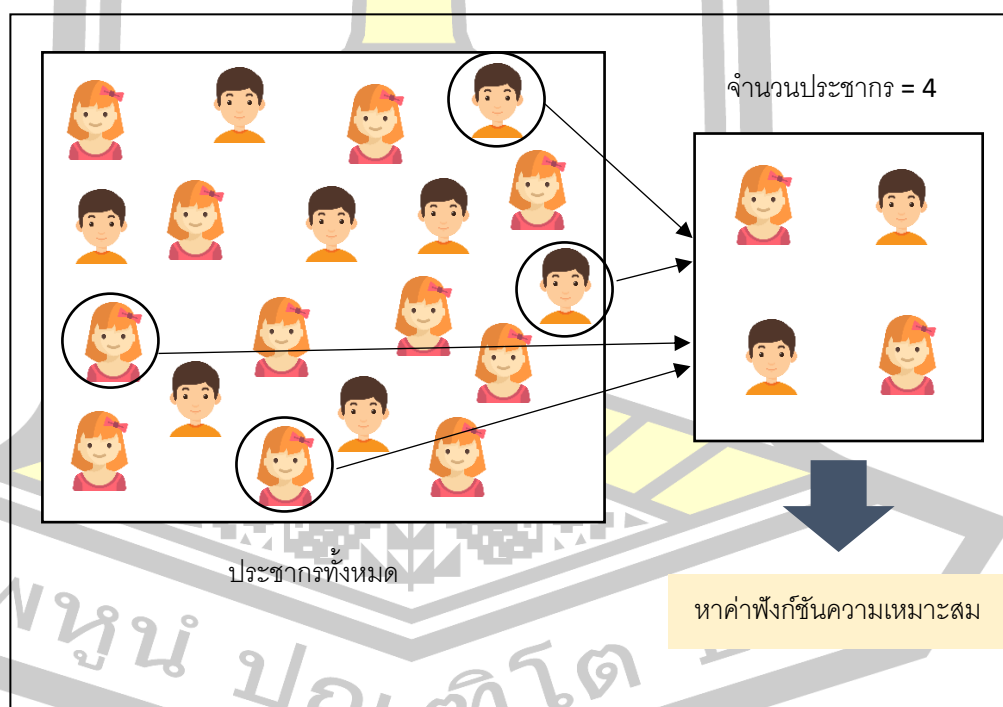
องค์ประกอบสำคัญของเชิงพันธุกรรม มีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

ก.) รูปแบบโครโมโซม (Chromosome Encoding) การถอดรหัส หรือการได้มาของโครโมโซม เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก ก่อนที่จะเริ่มแก้ปัญหาโดยเชิงพันธุกรรม ในการถอดรหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับปัญหานั้นๆ ดังนั้นรูปแบบของโครโมโซมจึงมีความแตกต่างกันออกไปตามปัญหานั้นๆ ที่นิยมใช้จะแสดงในรูปแบบเลขฐานสอง (Binary) โดยแต่ละตำแหน่งของยีนต์ในโครโมโซม จะเป็นค่าบิต มีค่า เป็น 0 หรือ 1 ตัวอย่างเช่น

โครโมโซม A : 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0

โครโมโซม B : 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1

ข.) ประชากรเริ่มต้น (Initial Population) เป็นการดำเนินการอันดับแรกก่อนที่จะเข้ากระบวนการของเชิงพันธุกรรม ประชากรเริ่มต้นนี้ได้มาจากการสุ่มเลือก (Random) จากประชากรทั้งหมด ดังภาพประกอบ 2.24 ในการสุ่มเลือกต้องให้ได้จำนวนประชากรเริ่มต้นตามที่กำหนดไว้ โดยที่ยังไม่มีการพิจารณาค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม



ภาพประกอบที่ 2.24 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้น จำนวน 4 โครโมโซม

ค.) ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) โครโมโซมทุกตัวจะต้องมีค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาว่า สมควรนำไปสืบสายพันธุ์ในรุ่นต่อไปหรือไม่ ดังนั้น ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม เป็นตัวที่ใช้ในการประเมินโครโมโซมนั้น มีความเหมาะสมหรือสามารถใช้เป็นคำตอบของปัญหาได้ดีเพียงใด ตัวอย่างของฟังก์ชันความเหมาะสม เช่น ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม = จำนวนของบิตที่มีค่าเป็น 1 ทั้งหมดในโครโมโซม

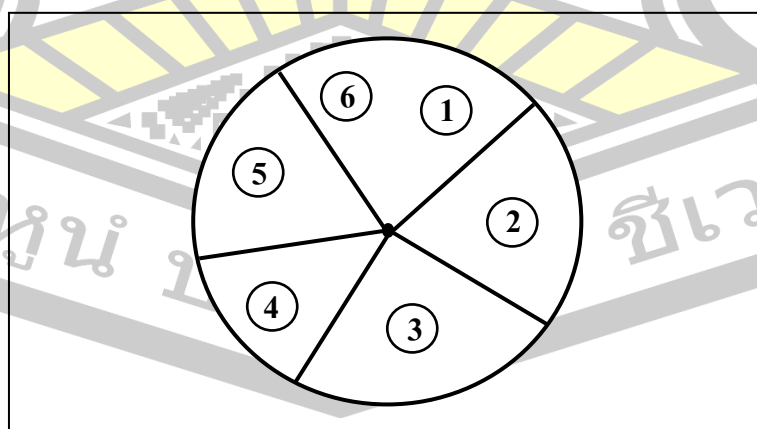
โครโมโซม A: 1 0 0 0 1 1 1 0 0 ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของโครโมโซม A คือ 4

โครโมโซม B: 1 1 0 1 1 1 0 0 1 ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของโครโมโซม B คือ 6

ง.) การดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operator) การดำเนินการทางพันธุกรรม เป็นหัวใจสำคัญของวิธีพันธุกรรมยีนด ซึ่งมีการบวนการพื้นฐานที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

1) การคัดเลือก (Selection) ในการคัดเลือกโครโมโซม เพื่อที่จะนำมาเป็นพ่อแม่ (Parent) ในการสืบสายพันธุ์ ทำให้เกิดปัญหาว่าจะทำอย่างไรให้การคัดเลือกโครโมโซมเป็นที่น่าสนใจ เพื่อที่จะเกิดการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต จึงทำให้เกิดรูปแบบมากมายในการคัดเลือกโครโมโซมที่น่าสนใจที่สุดเพื่อนำไปสืบพันธุ์ เช่น การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel) แบบจัดลำดับ (Ranking) และ แบบอีลิทิสต์ (elitist) การคัดเลือกแต่ละวิธี มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต คือโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีย่อมมีโอกาสถูกคัดเลือกมากกว่า อธิบายได้จากภาพประกอบที่ 2.25 แสดงวงล้อเสี่ยงโชค โดยขนาดพื้นที่ของวงล้อเสี่ยงโชค คือสัดส่วนของค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่มีค่ามากจะมีขนาดพื้นที่มากตามไปด้วย จึงมีโอกาสมากที่จะถูกคัดเลือกมาก

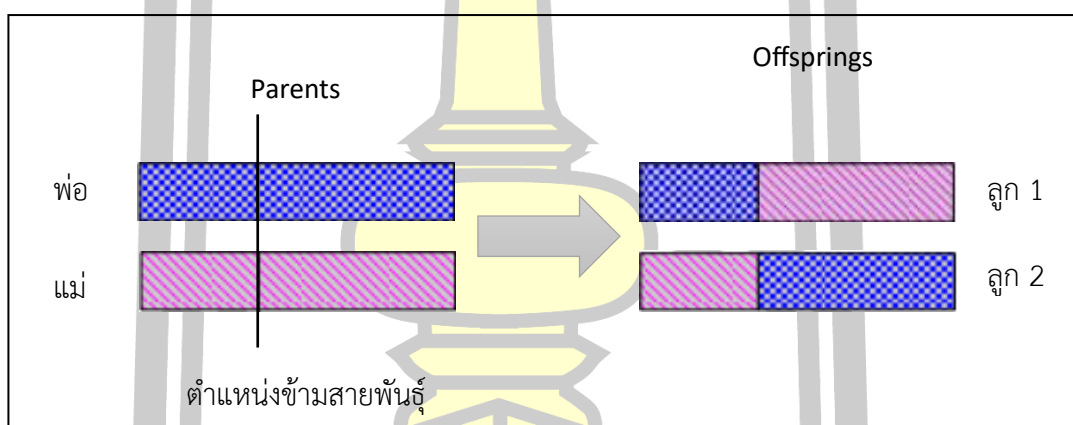


ภาพประกอบที่ 2.25 แสดงสัดส่วนของค่าฟังก์ชันความเหมาะสมในวงล้อรูเล็ต

การคัดเลือกแบบจัดลำดับ เป็นการคัดเลือกโครโมโซมโดยเรียงลำดับจากค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดจากมากไปหาน้อย

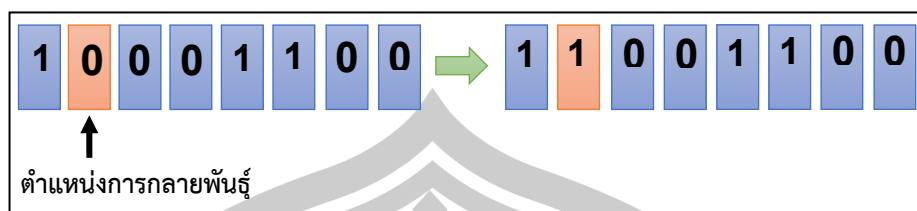
การคัดเลือกแบบอิลิทิส เป็นการคัดเลือกโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดไว้ก่อน ส่วนโครโมโซมที่เหลือจะใช้วิธีการคัดเลือกแบบอื่นๆ

2) การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) เป็นกระบวนการที่สำคัญของเชิงพันธุกรรม ซึ่งเมื่อเกิดการข้ามสายพันธุ์ขึ้น ในทาง พันธุศาสตร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายขึ้น ซึ่งการข้ามสายพันธุ์จะต้องอาศัยกระบวนการวิวัฒนาการที่เป็นเวลานาน ขั้นตอนในการข้ามสายพันธุ์ ทำได้โดยนำ 2 โครโมโซม (parent) มาผสมพันธุ์กัน เพื่อให้กำเนิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา วิธีการง่ายที่สุดคือ การสุ่มตำแหน่งของการข้ามสายพันธุ์ และ ทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งของพ่อ และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งของแม่มารวมกันเป็นลูกตัวที่ 1 จากนั้น ทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งของแม่ และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งของพ่อ มารวมกันเป็นลูกตัวที่ 2 ดังภาพประกอบที่ 2.26



ภาพประกอบที่ 2.26 การข้ามสายพันธุ์

3) การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากการข้ามสายพันธุ์เสร็จสิ้น นั่นหมายความว่าได้รุ่นลูกที่เกิดจากผสมพันธุ์จากรุ่นพ่อแม่แล้ว จึงนำรุ่นลูกมาดำเนินการกลายพันธุ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือทำให้เกิดลักษณะใหม่ๆ เกิดขึ้น หรือเกิดการวิวัฒนาการ ขั้นตอนในการกลายพันธุ์ ทำได้โดยการสุ่มตำแหน่งของการกลายพันธุ์ แล้วเปลี่ยนแปลงค่า ณ ตำแหน่งที่สุ่มนั้น ถ้าโครโมโซมอยู่ในรูปแบบเลขฐานสอง จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 1 เป็น 0 หรือ จาก 0 เป็น 1 ดังภาพประกอบที่ 2.27



ภาพประกอบที่ 2.27 การกลายพันธุ์

### 2.8.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเขาวนปัญญาเชิงกลุ่ม (Swarm Intelligent Optimization)

Swarm การเคลื่อนที่เป็นกลุ่ม ซึ่งเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่สามารถโต้ตอบกันภายในกลุ่มได้ เขาวนปัญญาเชิงเคลื่อนที่เป็นกลุ่ม ถือเป็นการเลียนแบบพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติอย่างหนึ่ง เหมือนกับอีกหลายๆ อัลกอริทึม เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม หรือโครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มสิ่งมีชีวิตอย่างมีรูปแบบเฉพาะนี้สามารถนำไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ลองจินตนาการตัวเรา และกลุ่มเพื่อนๆ ที่ช่วยกันค้นหาสมบัติแต่ละคนจะมีเครื่องตรวจจับโลหะ และสามารถสื่อสารสัญญาณและตำแหน่งปัจจุบันของตนเองกับคนที่อยู่ใกล้เคียงได้ ในกรณีนี้แต่ละคนรู้ว่าคนอื่นๆ รอบข้างนั้นอยู่ใกล้สมบัติกว่าหรือไม่ กล่าวคือถ้าคนใดคนหนึ่งใช้เครื่องตรวจจับโลหะเจอวัตถุที่คาดว่า จะเป็นสมบัติ คนอื่นๆ ก็จะรู้เห็นการค้นพบนี้ด้วย และทุกๆ คนก็จะมุ่งมายังจุดรอบๆ คนๆ นั้น ซึ่งเมื่อมีคนเพิ่ม จำนวนเครื่องตรวจจับโลหะก็เพิ่มขึ้น สามารถถือได้ว่าเป็นการเพิ่มโอกาสการค้นห สมบัตินั้นเอง แน่นอนว่าสมบัติจะถูกค้นพบได้เร็วกว่าการค้นหาเพียงคนเดียว

ตัวอย่างข้างต้นเป็นการแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของ Swarm โดยที่แต่ละตัวแทนภายใน กลุ่มการเคลื่อนที่จะสามารถสื่อสารโต้ตอบกันได้เพื่อนำไปสู่เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์แบบวงกว้าง (global) อย่างมีประสิทธิภาพ แตกต่างไปจากการค้นหาคำตอบด้วยตัวแทนเดียว ในเขาวนปัญญาเชิงเคลื่อนที่เป็นกลุ่มนี้ ตัวอย่างของสิ่งมีชีวิตที่ทำงานเป็นกลุ่มเช่น มด ผึ้ง ปลวก ปลา และนก เป็นต้น โดยการเคลื่อนที่เป็นกลุ่ม ถ้าพิจารณาตัวแทนเดี่ยว ภายในกลุ่มจะเห็นได้ว่าแต่ละตัวแทนมีโครงสร้าง ง่ายๆ แต่เมื่อแต่ละตัวแทนมีการสื่อสารโต้ตอบกันภายในกลุ่มแล้ว โครงสร้างการทำงานเป็นกลุ่มจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในอาณานิคมของมด (ant colony) มดแต่ละตัวจะทำงาน ง่ายๆ ไม่ก็อย่าง เมื่อมดหลายๆ ตัวรวมตัวกันทำงาน ผลที่ได้จะเป็นเช่นการสร้างรังที่เหมาะสมที่สุด การปกป้องราชินีมด และตัวอ่อน การหาแหล่งอาหารที่ดีที่สุด หรือการสร้างกลยุทธ์โจมตีที่เหมาะสม ที่สุด เป็นต้น

เขาวนปัญญาเชิงเคลื่อนที่เป็นกลุ่ม (Swarm Intelligence หรือ SI) ถือเป็นปัญญาประดิษฐ์ อย่างหนึ่ง ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มการกระจายของพฤติกรรม (behavior of decentralized) และการจัดการตนเอง (self-organized) ที่มาของชื่อ SI นั้น ถูกเสนอโดย Gerardo Beni และ Jing



Wang ในปี ค.ศ.1989 ในเนื้อหาของงานเกี่ยวกับระบบโครงข่ายหุ่นยนต์ (cellular robotic systems)

ระบบ SI โดยปกติแล้วจะประกอบไปด้วยกลุ่มประชากรของตัวแทนที่ไม่ซับซ้อน แต่ละตัวแทนสามารถสื่อสารกับตัวแทนอื่นๆ ภายในพื้นที่และสามารถสื่อสารกับสภาวะแวดล้อมได้ ตัวแทนภายในกลุ่มจะทำหน้าที่ง่ายๆ โดยไม่มีโครงสร้างหรือหน้าที่ที่กำหนดจากส่วนกลางของระบบแต่อย่างใด การทำงานร่วมกันเป็นกลุ่มทำให้เกิดพฤติกรรมของระบบที่ใหญ่และซับซ้อนได้ ตัวอย่างสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติที่ SI ได้รับอิทธิพลทางด้านแนวคิดเช่น การทำงานในอาณานิคมมด การแห่กันไปของฝูงนกหรือปลา การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย การตอนฝูงสัตว์เลี้ยง เป็นต้น

เมื่อพิจารณาแต่ละตัวแทนเดี่ยว ภายในกลุ่ม พฤติกรรมโดยรวมของการทำงานเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิต จะมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ดังนั้นจะมีการคู่ควบแบบแนบแน่นระหว่างพฤติกรรมส่วนตัวของแต่ละตัวแทนเดี่ยวภายในกลุ่ม กับพฤติกรรมโดยรวมของกลุ่ม พฤติกรรมของแต่ละตัวแทนเดี่ยว เมื่อรวมกันแล้วจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมรวมของกลุ่ม ในขณะที่พฤติกรรมรวมของกลุ่ม ก็เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขที่ตัวแทนแต่ละตัวจะต้องกระทำ การกระทำดังกล่าวอาจจะมีผลต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งทำให้พฤติกรรมของตัวแทนนั้นๆ เปลี่ยนไปด้วย การกำหนดเงื่อนไขของพฤติกรรมรวมของกลุ่มมีทั้งแบบเชิงพื้นที่และเชิงเวลา

พฤติกรรมเคลื่อนที่ของกลุ่มไม่ได้กำหนดด้วยตัวแทนตัวใดตัวหนึ่ง แต่การสื่อสารโต้ตอบระหว่างแต่ละตัวแทนเป็นตัวกำหนดกฎเกณฑ์ในพฤติกรรมของกลุ่ม การสื่อสารโต้ตอบระหว่างตัวแทนนั้นช่วยทำให้เกิดการกลั่นกรองและแลกเปลี่ยนประสบการณ์ความรู้เกี่ยวกับสภาพแวดล้อม และช่วยเพิ่มสมรรถนะการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานเป็นกลุ่มคือการจัดการตัวเอง (self-organize) เช่นในกรณีอาณานิคมของมด การจัดการตนเองนำไปสู่โครงสร้างของรังที่เหมาะสมที่สุด การกระจายแรงงานหรือการรวบรวมอาหาร เป็นต้น

อัลกอริทึมเชิงเคลื่อนที่เป็นกลุ่มนั้นมีข้อดีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อนแต่มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหลายๆอย่าง ได้เนื้อหาในภาคนี้จะนำเสนอรายละเอียดของอัลกอริทึมเชิงเคลื่อนที่สองแบบ ที่ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย อัลกอริทึมดังกล่าวคือ วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) วิธีฝูงมด (Ant Colony Optimization; ACO) และวิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm; BA)

### 2.8.3 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)

Kennedy และ Eberhart ได้เสนอแนวคิดของวิธีกลุ่มอนุภาคเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ.1995 ได้แรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมของการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ เช่น ฝูงปลา หรือ ฝูงนก ซึ่งวิธีกลุ่มอนุภาคนี้เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสม อาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร (Population-based) แต่ละตัวดำเนินการ เรียกว่า อนุภาค (Particle) ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ อนุภาคนี้อาจรวมตัวกัน

เป็นกลุ่ม อยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา ระหว่างแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่งโดยอาศัยการอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่เคลื่อนที่ผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางการเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งอาจจะค้นพบด้วยตัวเอง หรือ อนุภาคใกล้เคียง

ระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธีกุ่มอนุภาค มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขอบเขตต่ำสุด ( $X_{Lower}$ ), สูงสุด ( $X_{Upper}$ ) ของพารามิเตอร์ทุกตัว และทำการสุ่มหาตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคแต่ละตัว  $(X)^t$ , สุ่มหาแต่ละมิติ, สุ่มหาความเร็วเริ่มต้น  $(V)^t$ , จากนั้นกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นของตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของอนุภาคแต่ละตัว ( $pbest$ ) และกำหนดอนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด ( $gbest$ ) ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคืออยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 หาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอนุภาค

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประเมินเปรียบเทียบค่าของอนุภาคแต่ละตัวแล้วกำหนดให้เป็น  $pbest$  จากนั้นเลือกค่าที่ดีจากค่า  $pbest$  โดยกำหนดให้เป็น  $gbest$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับเปลี่ยนความเร็วใหม่ของอนุภาคของแต่ละตัว

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อได้ความเร็วใหม่จากขั้นตอนที่ 4 ให้ตรวจสอบ

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} > v_d^{max}, & \text{ ให้ } v_{id}^{t+1} = v_d^{max} \text{ และถ้า} \\ v_{id}^{t+1} < v_d^{min} & \text{ ให้ } v_{id}^{t+1} = v_d^{min} \end{aligned} \quad (2.30)$$

ขั้นตอนที่ 6 ปรับเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ของอนุภาคของแต่ละตัว โดยใช้สมการ 2.30 จากนั้นให้ตรวจสอบ

$$\begin{aligned} x_{id}^{t+1} > p_d^{max}, & \text{ ให้ } x_{id}^{t+1} = p_d^{max} \text{ และถ้า} \\ x_{id}^{t+1} < p_d^{min}, & \text{ ให้ } x_{id}^{t+1} = p_d^{min} \end{aligned} \quad (2.31)$$

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบตำแหน่งใหม่ของอนุภาคจะต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ แต่ถ้าไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับก็ให้อนุภาคนั้นอยู่ตำแหน่งเดิม

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าถึงค่าสูงสุดแล้วให้หยุดทำงาน ถ้ายังไม่ถึงค่าสูงสุดให้ย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2



การเปลี่ยนความเร็ว และตำแหน่งของแต่ละอนุภาค สามารถคำนวณได้โดยใช้ความเร็วปัจจุบันและระยะทางระหว่าง  $pbest_{id}$  ถึง  $gbest_d$  ดังสมการที่ 2.32 และ 2.33

$$v_{id}^{t+1} = \omega \cdot v_{id}^t + c_1 * rand() * (pbest_{id} - x_{id}^t) + c_2 * rand() * (gbest_d - x_{id}^t) \quad (2.32)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2.33)$$

องค์ประกอบที่สำคัญของวิธีอนุภาคและการกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของระเบียบวิธีอนุภาค คือ

$d$  คือ มิติ (Dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา

$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  แทน ตำแหน่งของอนุภาค  $i$

$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$  แทน อัตราความเร็วสำหรับอนุภาคที่  $i$

$pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{id})$  แทน ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของอนุภาคที่  $i$

$gbest_d$  แทน อนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด

$m$  แทน จำนวนอนุภาค

$n$  แทน จำนวนอนุภาคในกลุ่ม

$t$  แทน ครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration)

$\omega$  แทน ตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย (Inertial Weight Factor)

$c_1, c_2$  แทน ค่าคงที่ของอัตราเร่ง

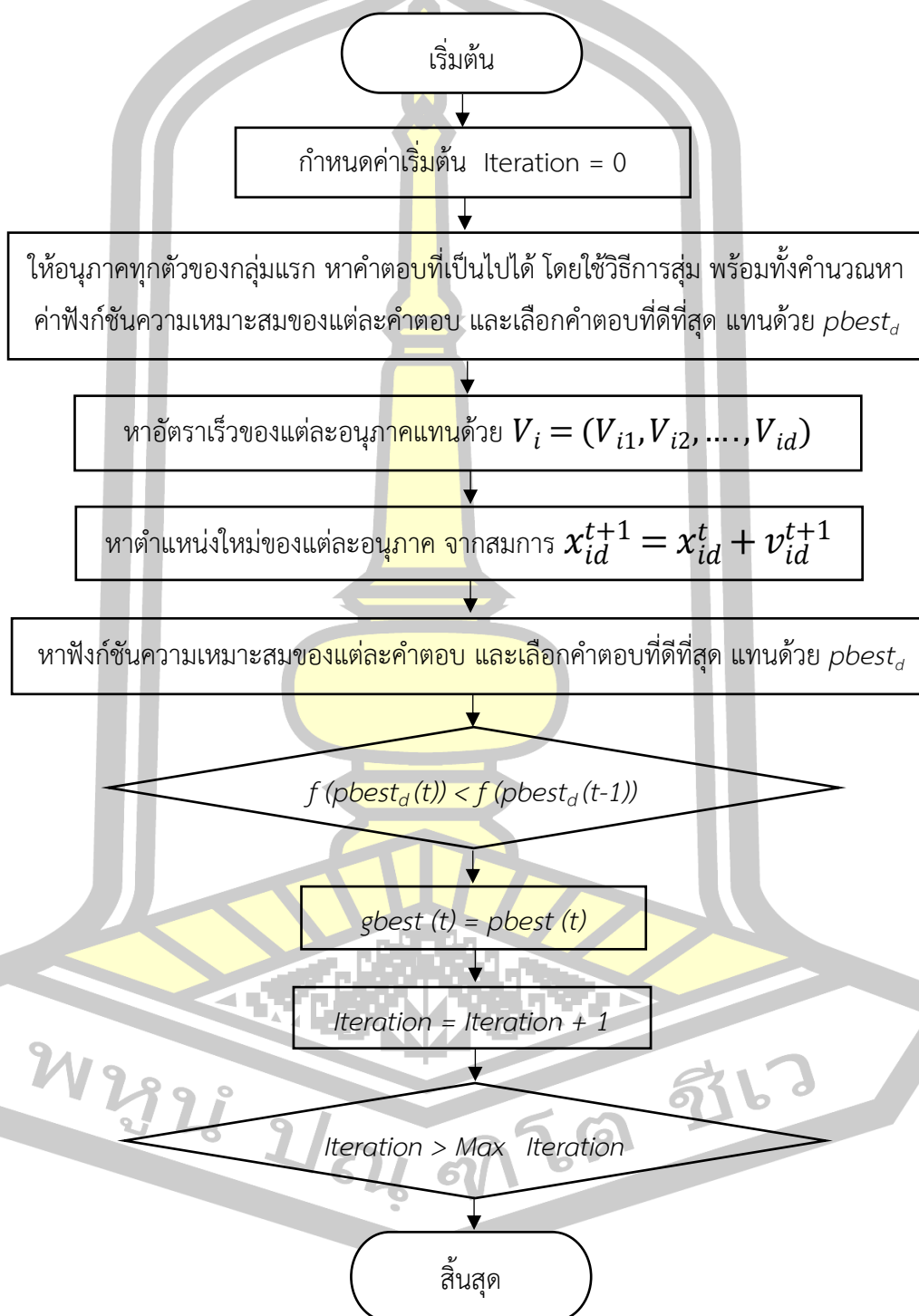
$rand()$  แทน ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง  $[0,1]$

$v_i^t$  แทน ความเร็วของอนุภาคที่  $i$  ในรอบที่  $t$  โดยที่  $v_d^{min} \leq v_{id}^t \leq v_d^{max}$

ค่า  $V^{max}$  ใช้หาค่าความละเอียดของคำตอบ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้อนุภาคบินผ่านคำตอบที่ดีที่สุดไป แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปอาจจะค้นหาไม่ครอบคลุมทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นจากการทดสอบ ควรจะกำหนดค่า  $V^{max}$  ประมาณ 10-20% ของช่วงการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรแต่ละตัว ค่าคงที่  $c_1$  และ  $c_2$  แทนน้ำหนักของความเร็วแบบสุ่มของแต่ละอนุภาคผ่านตำแหน่ง  $pbest$  และ  $gbest$  ถ้ามีค่าน้อยเกินไป ในกรณีที่อนุภาคอยู่ห่างจากตำแหน่งเป้าหมายก็อาจจะหมดแรงก่อนถึงเป้าหมาย แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปก็อาจจะบินข้ามเป้าหมายไป ดังนั้นค่า  $c_1$  และ  $c_2$  จากการทดสอบมาแล้วควรอยู่ระหว่าง 1.4–2.0 การเลือกค่า  $\omega$  ที่เหมาะสม

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (2.34)$$

$$\text{ค่าที่เหมาะสม คือ } \omega_{max} = 0.9 \text{ และ } \omega_{min} = 0.4 \quad (2.35)$$

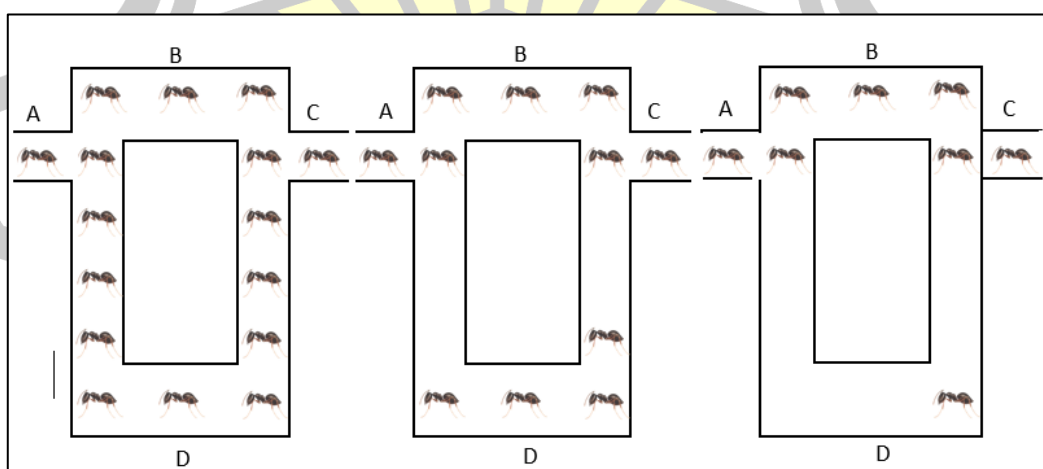


ภาพประกอบที่ 2.28 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีกลุ่มอนุภาค

#### 2.8.4 วิธีฝูงมด (Ant Colony Algorithm; ACO)

Ant Colony Algorithm ถูกคิดค้นโดย Marco Dorigo และ Luca Maria Gambardella ในปี 1991 เป็นวิธีแก้ปัญหานิตหนึ่งที่น่าสนใจหลักการ และแรงบันดาลใจมาจากความฉลาดทางธรรมชาติของมดในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างแหล่งอาหารและรัง โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการสร้างผลผลิตของ ACO สามารถแยกได้เป็น 2 รูปแบบคือ การสร้างผลเฉลยแบบขนาน (Parallel Solution Construction) และการสร้างผลเฉลยแบบลำดับ (Sequential Solution Construction) ซึ่งลักษณะการสร้างผลเฉลยแบบขนานคือ ในแต่ละขั้นตอนของการสร้างผลเฉลย มดทุกตัวในตำแหน่งเดิมจะเลือกตำแหน่งถัดไปพร้อมกัน จนกระทั่งมดทุกตัวได้ผลเฉลยหรือเส้นทางที่สมบูรณ์พร้อมกัน ในขณะที่การสร้างผลเฉลยแบบลำดับ มดจะถูกปล่อยให้สร้างผลเฉลยทีละตัว จนกระทั่งมดดังกล่าวได้ผลเฉลยที่สมบูรณ์ จากนั้นจึงให้มดตัวถัดไปเริ่มสร้างผลเฉลยใหม่

มดจะการใช้การติดต่อสื่อสารระหว่างกันทางอ้อม (Indirect Communication or Stigmergy) ด้วยสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า สารฟีโรโมน (Pheromone) ซึ่งเป็นสารเคมีที่มดจะทิ้งไว้บนเส้นทางเดินในขณะที่มดเดินทาง และเมื่อมดตัวอื่นได้กลิ่นสารฟีโรโมนจะทำการเพิ่มความน่าจะเป็นไปได้ (Probability) ที่มดตัวนั้นจะเลือกเดินทางเดียวกับมดตัวแรก พร้อมกับปล่อยสารฟีโรโมนไว้บนเส้นทางนั้นเพิ่มขึ้นไปอีก ทำให้เส้นทางดังกล่าวมีปริมาณสารฟีโรโมนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกลไกนี้เรียกว่า กระบวนการป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback or Autocatalytic Mechanism) นอกจากนี้ธรรมชาติของสารฟีโรโมนยังมี การระเหย (Pheromone Decay) อยู่ตลอดเวลา เส้นทางใดก็ตามที่มีปริมาณสารฟีโรโมนน้อยลง ความน่าจะเป็นไปได้ที่มดจะเลือกเส้นทางดังกล่าวจึงมีน้อยลง จนท้ายที่สุดปริมาณสารฟีโรโมนบนเส้นทางนั้นจะถูกระเหยไปจนหมด ซึ่งเรียกกลไกนี้ว่ากระบวนการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback)



ภาพประกอบที่ 2.29 แผนภาพแสดงการเลือกทางเดินที่สั้นที่สุดของมด

จากภาพประกอบที่ 2.29 ซึ่งเป็นตัวอย่างการหาเส้นทางเดินของมดสามารถอธิบายได้ว่าที่เวลาเท่ากับศูนย์มดจะทำการเดินทางจุด A ไปยังจุด C โดยใช้หลักการสุ่ม (Random) สังเกตได้ว่าจำนวนของมดที่เส้นทาง A-B-C และเส้นทาง A-D-C มีปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไป Time = 5 ปริมาณของมดในเส้นทาง A-B-C เริ่มมีจำนวนมากกว่าปริมาณมดในเส้นทาง A-D-C เนื่องจากเส้นทาง A-B-C มีระยะทางที่สั้นกว่าเส้นทาง A-D-C จึงมีจำนวนมดเดินผ่านมากกว่า ส่งผลให้มีปริมาณฟีโรโมนบนเส้นทาง A-B-C มากขึ้นพิจารณา Time = 10 พบว่ามีมดส่วนใหญ่เลือกเส้นทาง A-B-C ซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดได้

จากแนวคิดนี้จึงได้เกิดวิธีการมดเทียม (Artificial Ants) ขึ้นมาโดยการจำลองวิธีการแก้ปัญหาในการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดของมดจริงตามธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ของมนุษย์ซึ่งยังคงไว้ตามหลักการของมดจริง ดังนั้นจึงเรียกวิธีการแก้ปัญหาโดยอาศัยหลักการของมดนี้ว่า การค้นหาแบบอาณานิคมมด จากนั้นวิธีการค้นหาแบบอาณานิคมมด ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตาราง 2.3 ACO และผู้คิดค้น

| วิธีการ                           | ผู้คิดค้น                             |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Ant system (AS)                   | Dorigo, Maniezzo and Colonies (1991)  |
| Elitist ant system (EAS)          | Dorigo, Maniezzo and Colonies (1992)  |
| Ant - Q                           | Gambadella and Dorigo (1995)          |
| Rank - Based ant system (AS-rank) | Bullnheimer, Harlt and Strauss (1997) |
| Max - Min ant system (MMAS)       | Stutale and Hoos (1997)               |
| Ant colony system (ACS)           | Dorigo and Gambadella (1997)          |

#### 2.8.5 วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm; BA)

D.T.Pham และคณะ ได้นำเสนอแนวคิดฝูงผึ้ง (Bee Algorithm; BA) เมื่อปี ค.ศ.2005 เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการเลียนแบบพฤติกรรมกรหาน้ำหวานของผึ้งดำเนินงานผ่านผึ้ง โดยแบ่งชนิดของผึ้ง ออกเป็น 2 ประเภท คือ ผึ้งสอดแนม (Scout bee) และ ผึ้งงาน (Employee bee) เพื่อหาคำตอบ โดยสมมุติว่าคำตอบคือ แหล่งน้ำหวาน หน้าที่ของผึ้งสอดแนม คือ ค้นหาแหล่งน้ำหวานแบบสุ่มในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ (Search space) เมื่อผึ้งสอดแนมค้นหาคำตอบได้ ก็จะบินกลับมาที่รังผึ้ง เพื่อสื่อสารกับผึ้งตัวอื่นๆ ภายในรังผึ้ง การสื่อสารของผึ้งจะใช้วิธีการเด่นลักษณะต่างๆ เพื่อบอกปริมาณของน้ำหวาน ทิศทางของแหล่งน้ำหวาน จากนั้นผึ้งงานก็จะ

ไปทำหน้าที่ขนน้ำหวานในแหล่งน้ำหวาน โดยจำนวนผึ้งงานจะแปรตามปริมาณน้ำหวานและระยะทาง โดยตัวแปรและขั้นตอนสำหรับวิธีผึ้งผึ้ง มีดังนี้

เมื่อ  $NC$  คือ จำนวนครั้งของการทำซ้ำ

$N$  คือ จำนวนของผึ้งสอดแนม

$M$  คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมาก จากการหาของผึ้งสอดแนม  $n$  ตัว

$E$  คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมากที่สุด จากที่เลือกแล้ว  $m$  ตัว

$nep$  คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน  $e$  แหล่ง

$nsp$  คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน  $m-e$  แหล่ง

$ngh$  คือ ขนาดของขอบเขตในการค้นหาของแหล่งน้ำหวานแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 1 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n$  ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC=0$

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี  $m$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 4 คัดแยกคำตอบ  $m$  คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด  $e$  คำตอบและกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ด้อยลงมา  $m-e$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขอบเขตในการค้นหาวิธีรอบๆ คำตอบ  $m$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน  $nep$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $e$  คำตอบ ผึ้งงานจำนวน  $nsp$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $m-e$  คำตอบ

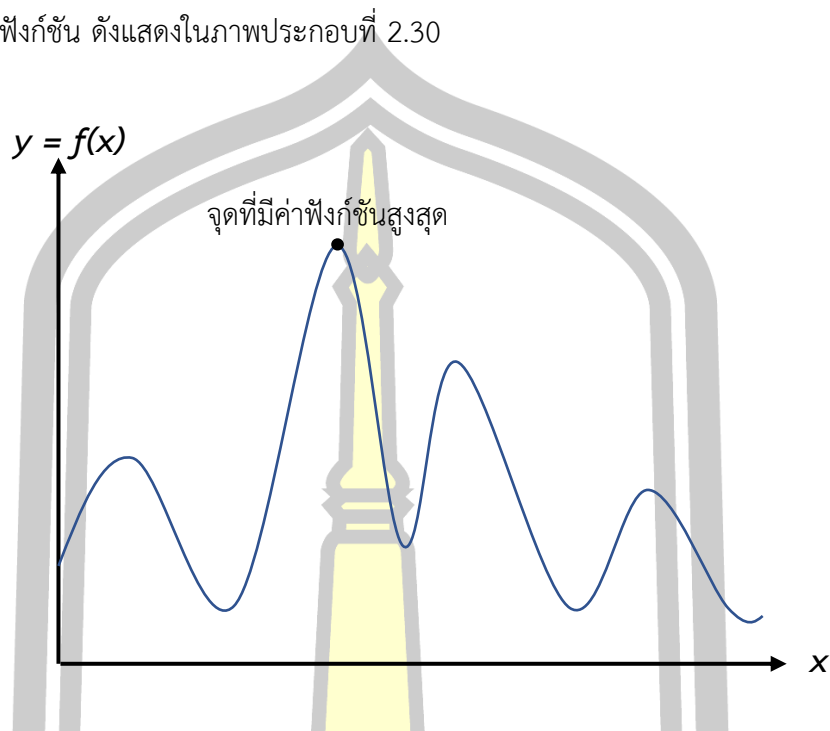
ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไข ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC = NC + 1$

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n-m$  ตัว ค้นหาคำตอบใหม่ แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2

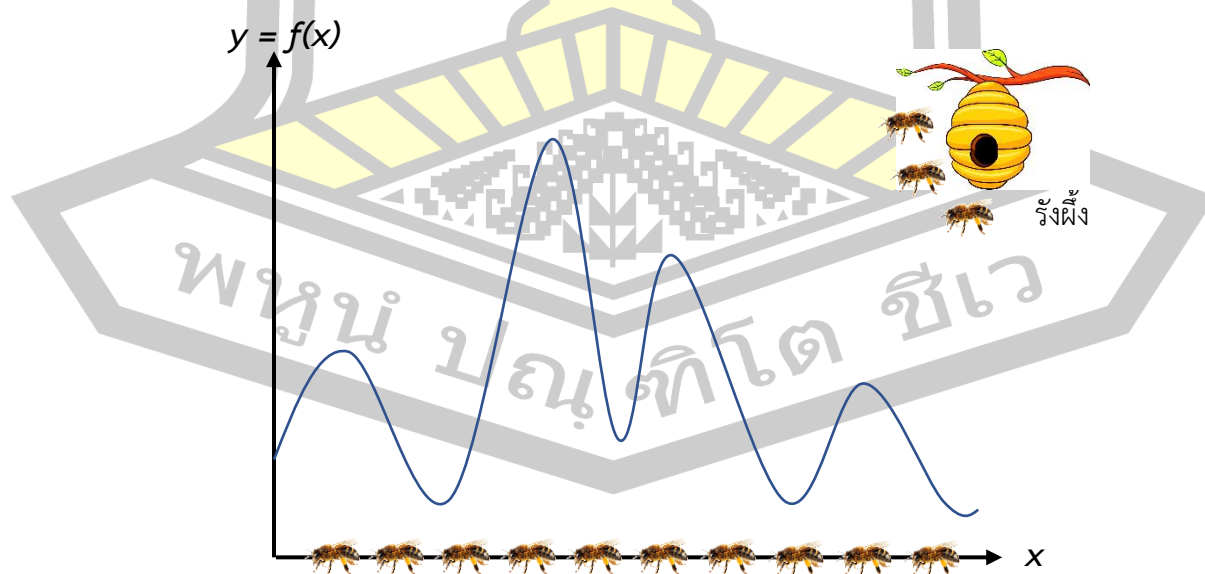
การประยุกต์ใช้วิธีผึ้งผึ้งสำหรับแก้ไขปัญหาค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อเป็นการอธิบายถึงการประยุกต์ใช้วิธีผึ้งผึ้งสำหรับแก้ไขปัญหาค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสม ผู้ศึกษาขออธิบายพร้อมทั้งยกตัวอย่าง

เพื่อให้เห็นภาพได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเป็นการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ที่มีลักษณะของฟังก์ชัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.30



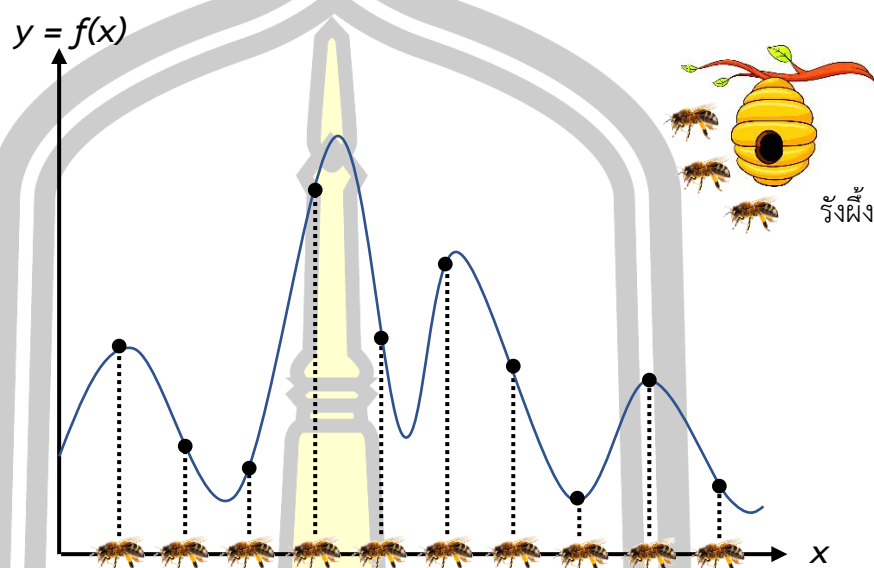
ภาพประกอบที่ 2.30 ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการหาค่าสูงสุด

ขั้นตอนที่ 1 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n=10$  ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC = 0$  ดังแสดงในภาพประกอบ 2.31



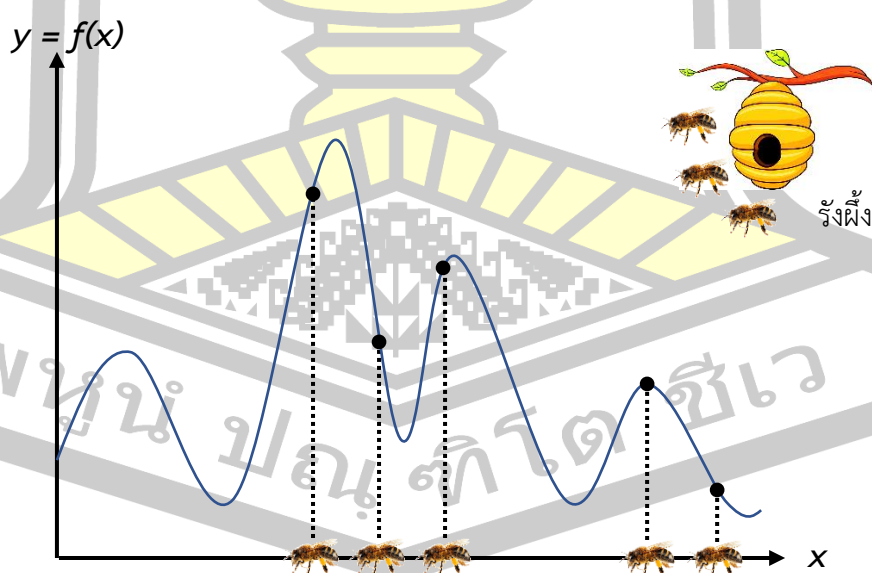
ภาพประกอบที่ 2.31 ผึ้งสอดแนม  $n=10$  ตัว สุ่มหาคำตอบเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย



ภาพประกอบที่ 2.32 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม

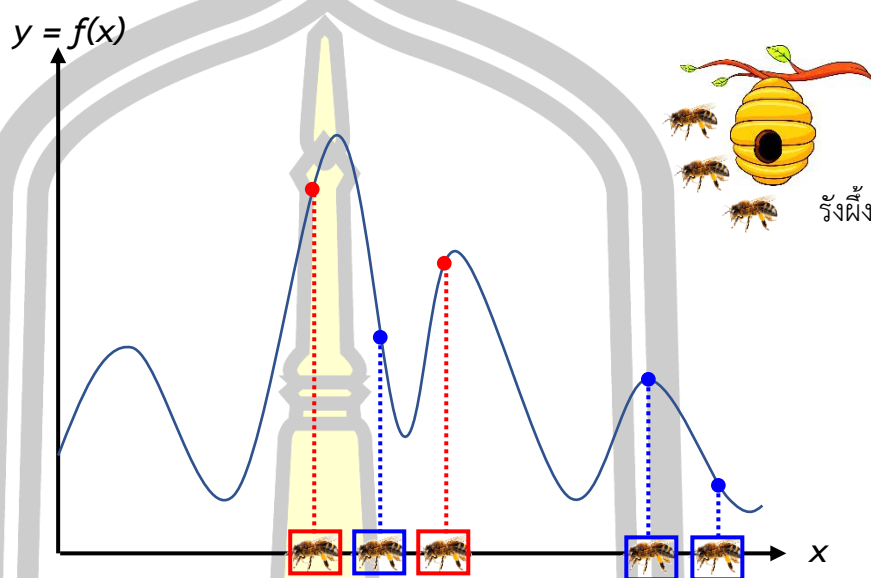
ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี  $m=5$  คำตอบ



ภาพประกอบที่ 2.33 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี  $m=5$  คำตอบ

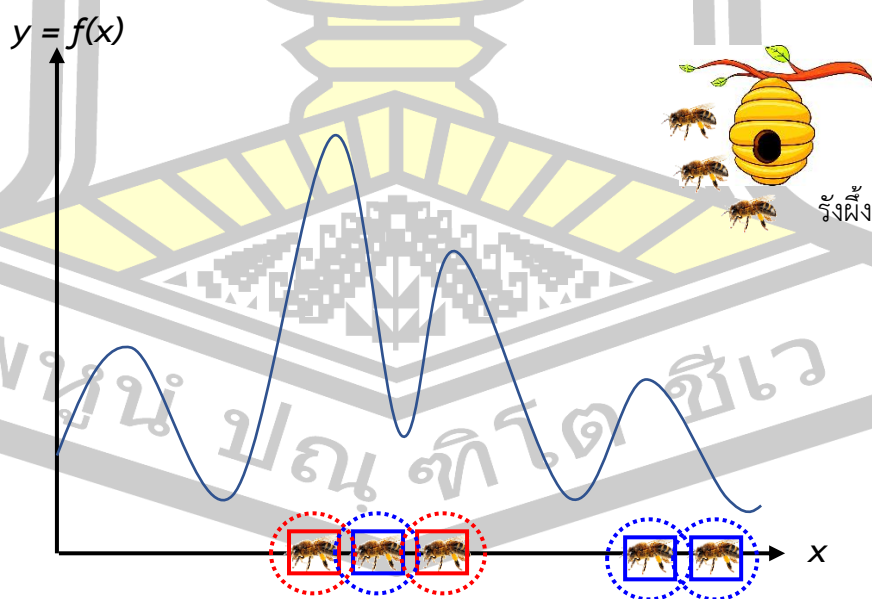


ขั้นตอนที่ 4 คัดแยกคำตอบ  $m=5$  คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด  $e=2$  คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ีรองลงมา  $m-e=3$  คำตอบ



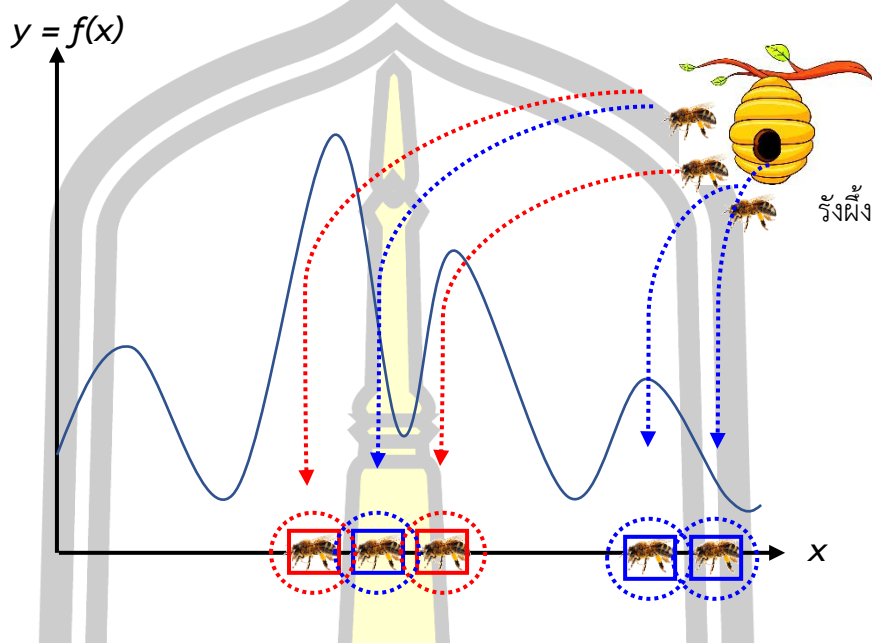
ภาพประกอบที่ 2.34 คัดแยกคำตอบออกเป็น 2 กลุ่ม

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขอบเขตในการค้นหาวิเวณรอบ ๆ คำตอบ  $e=2$  คำตอบ และ  $m-e=3$  คำตอบ



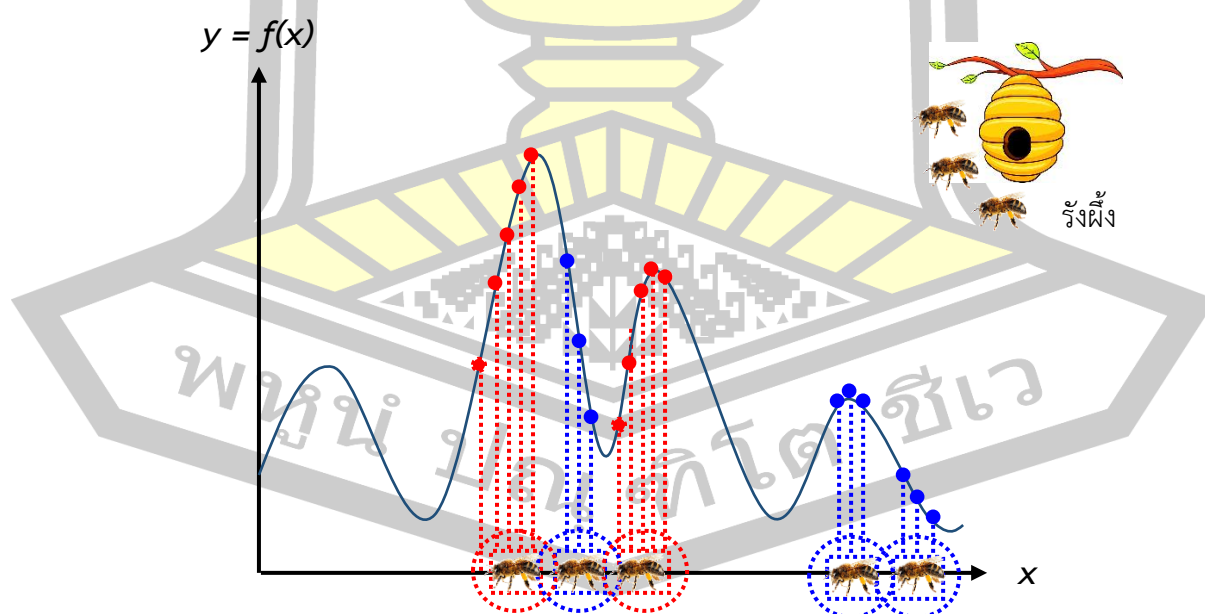
ภาพประกอบที่ 2.35 กำหนดขอบเขตในการค้นหาวิเวณรอบๆ

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน  $n_{ep}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ  $e$  คำตอบ และ ผึ้งงานจำนวน  $n_{sp}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ  $m - e$  คำตอบ

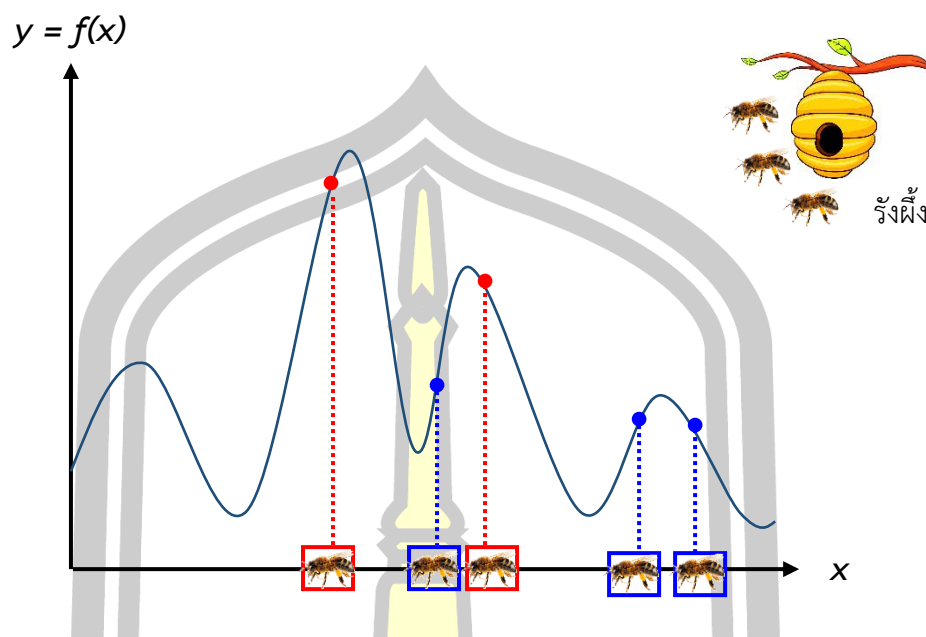


ภาพประกอบที่ 2.36 ผึ้งงานค้นหาคำตอบรอบๆ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง



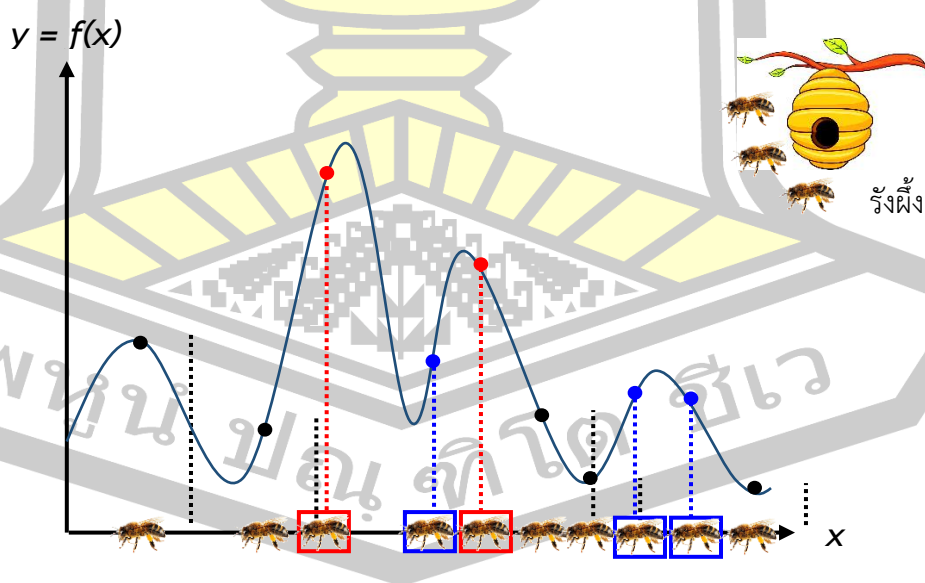
ภาพประกอบที่ 2.37 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้ง



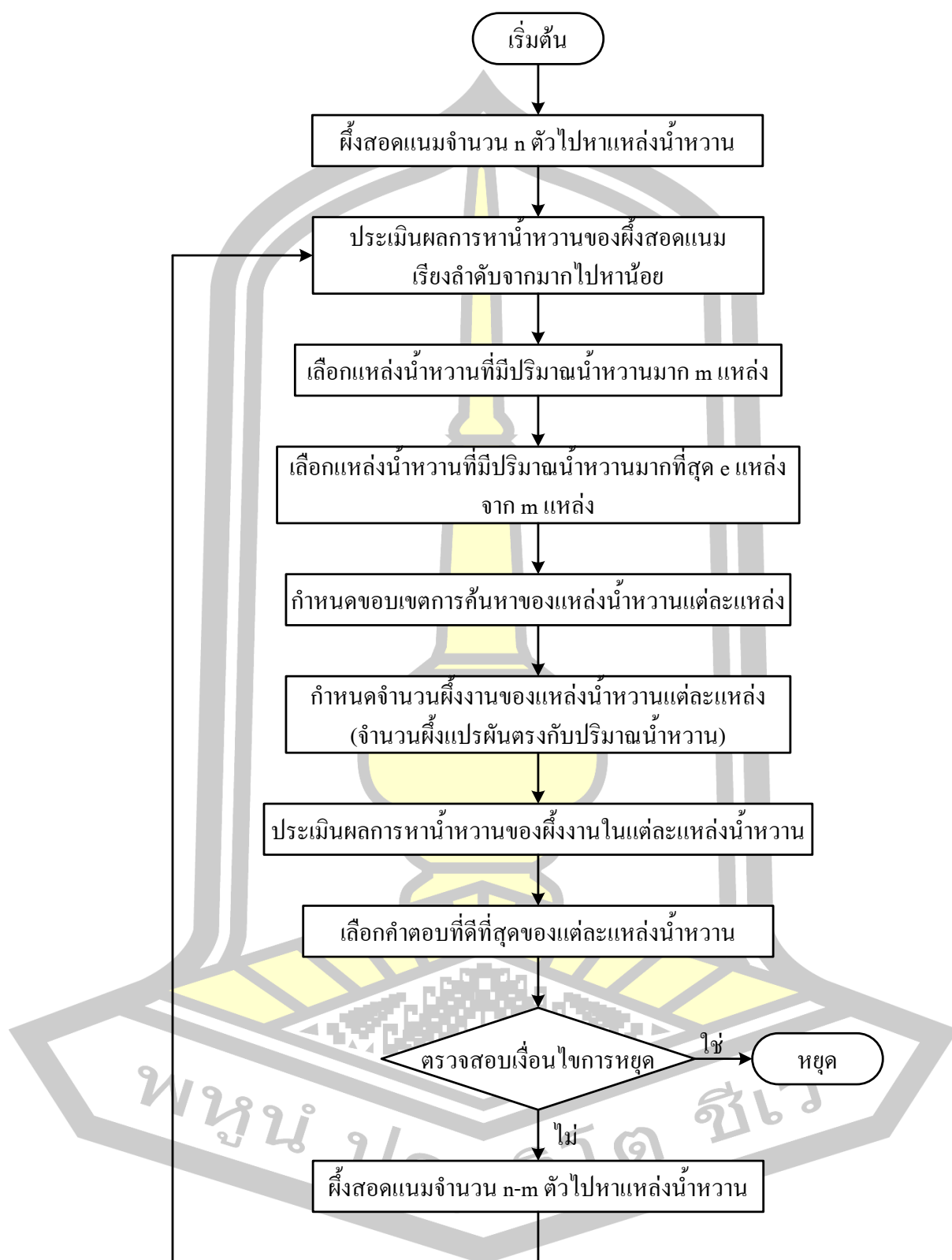
ภาพประกอบที่ 2.38 เลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC = NC + 1$

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n - m = 5$  ตัว ค้นหาคำตอบใหม่ แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนได้คำตอบที่สูงที่สุด ดังภาพประกอบที่ 2.39



ภาพประกอบที่ 2.39 ผึ้งสอดแนม  $n - m = 5$  ค้นหาคำตอบเริ่มต้นใหม่



ภาพประกอบที่ 2.40 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้ง

ตาราง 2.4 สรุปข้อดีข้อเสียของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

| เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม | ข้อดี                                                                                                                                                                                                                                                                            | ข้อเสีย                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| วิธีพันธุกรรม<br>ยีนต์   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. การแก้ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน</li> <li>2. การหาทางออกที่ดีที่สุดระดับโลกในหลายๆ ปัญหา</li> <li>3.ง่ายต่อการรวมอัลกอริทึมอื่นๆ</li> <li>4. การออกแบบสำหรับพื้นที่การค้นหาจริงในไบนารี</li> </ol>                          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. อัตราการลู่เข้าช้า</li> <li>2. ค้นหาโซลูชันที่เหมาะสมที่สุด</li> <li>3. ผลลัพธ์ที่คาดเดาไม่ได้</li> <li>4. การพึ่งพาของครอสโอเวอร์และอัตราการกลายพันธุ์ต่อเสถียรภาพและการลู่เข้า</li> <li>5.การค้นหาในท้องถิ่นอ่อนแอ</li> <li>6.รูปแบบการเข้ารหัสยาก</li> </ol> |
| วิธีกลุ่มอนุภาค          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. โครงสร้างที่เรียบง่าย</li> <li>2. ประยุกต์ใช้งานง่าย</li> <li>3. ค้นหาคำตอบได้รวดเร็ว</li> <li>4. ปรับค่าพารามิเตอร์น้อยตัว</li> <li>5. แนวทางการค้นหาคำตอบเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ</li> <li>6. ขึ้นอยู่กับจุดเริ่มต้น</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. การค้นหาในบริเวณ Local ได้ไม่ดี</li> <li>2. อัตราการลู่เข้าช้าและการติดบริเวณคำตอบเฉพาะถิ่นได้เมื่อนำไปแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนสูง</li> </ol>                                                                                                                       |
| วิธีฝูงมด                | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความยืดหยุ่นความแข็งแกร่งและความยืดหยุ่นในสภาพแวดล้อมแบบไดนามิก</li> <li>2. เหมาะสมสำหรับปัญหากราฟ</li> </ol>                                                                                                                          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไม่มีรหัสง่าย ๆ</li> <li>2. การใช้การทดลองและข้อผิดพลาดในการเริ่มต้นพารามิเตอร์</li> <li>3. อัลกอริทึมดั้งเดิมได้รับการออกแบบสำหรับพื้นที่การค้นหาแบบแยก</li> <li>4. การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่ยาก</li> </ol>                                                     |
| วิธีฝูงผึ้ง              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. อัลกอริทึมสามารถค้นหาบริเวณคำตอบที่ดีและคำตอบที่ดีที่สุด</li> <li>2. ดำเนินการด้วยปัญหาการปรับให้เหมาะสมหลายประการ</li> <li>3. ประยุกต์ใช้งานง่าย</li> <li>4. มีให้สำหรับการผสมแบบไฮบริดกับอัลกอริทึมอื่นๆ</li> </ol>                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. การเริ่มต้นแบบสุ่ม</li> <li>2. อัลกอริทึมมีพารามิเตอร์หลายที่ต้องปรับจูน</li> <li>3. ต้องปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา</li> </ol>                                                                                                                        |

จากการศึกษาวิธีฝูงผึ้งพบว่า มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน ประยุกต์ใช้งานง่าย ใช้พารามิเตอร์น้อย หมายถึงจำนวนประชากรผึ้งน้อยก็สามารถหาคำตอบได้ดี หาคำตอบได้เร็ว และคำตอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ข้อเสียของวิธีฝูงผึ้ง คือถ้ากำหนดขอบเขตการค้นหาไม่เหมาะสมจะได้คำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นคุณสมบัติเหล่านี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ในการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอฟโออาร์

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Agrawal, N., Kumar, A., & Bajaj, V. ในบทความนี้ใช้วิธีขั้นตอนแบบ meta-heuristic ที่รู้จักกันด้วยชื่อว่าอัลกอริทึม artificial bee colony (ABC) เพื่อการออกแบบตัวกรอง infinite impulse response (IIR) แบบดิจิทัล ซึ่งเน้นการลดค่า mean square error (MSE) ระหว่างการตอบสนองที่เป็นไปตามไอดีกับการตอบสนองที่ต้องการของตัวกรอง ในวิธีนี้ ความมั่นคงของตัวกรอง IIR ในระหว่างการออกแบบถูกยืนยันด้วยการใช้โครงสร้างเรขาคณิต เนื่องจากมันทำให้ง่ายต่อการรักษาความมั่นคง พร้อมทั้งมีต้นทุนในการคำนวณน้อยลง เพิ่มอีกนอกจากนี้ มันยังช่วยในการออกแบบตัวกรองระดับสูงมีความสามารถในการค้นหาที่ดีขึ้น ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมได้รับการพิสูจน์ด้วยการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ความถี่กับอัลกอริทึมที่มีอยู่แล้ว ตามด้วยการวิเคราะห์อย่างละเอียดของตัวกรองที่แตกต่างกัน

DHABAL, Supriya, et al. บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบและการออกแบบตัวกรอง FIR ระดับสูงประเภท 2 ที่ใช้ Cuckoo Search Algorithm (CSA), Gravitational Search Algorithm (GSA), และ Artificial Bee Colony (ABC) algorithm ซึ่ง CSA ทำให้การรวมตัวทั่วโลกเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นทั่วพื้นที่ค้นหาในปัญหาการออกแบบตัวกรอง FIR หลายประการ จากการวิเคราะห์กราฟพฤติกรรมรวมตัวของ CSA, GSA และ ABC ชัดเจนว่า CSA มีการรวมตัวเร็วกว่า นอกจากนี้การดูดซับในสถานการณ์แถบหยุด ( $A_s$ ) และการระแวงแถบผ่าน ( $R_p$ ) ที่ได้จาก CSA ดีกว่า GSA และ ABC ในกรณีของตัวกรองระดับที่ 79 ตัวกรอง CSA ที่เสนอแสดงผลลัพธ์ที่ดีขึ้นที่  $A_s$  ถึง 7.89% และ  $R_p$  ถึง 9.43% เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม Parks and McClellan

Anand, A., Yadav, S., & Saha, S. K. ในบทความนี้แนะนำเสนออัลกอริทึมการปรับปรุงทฤษฎีใหม่เรียกว่า Artificial Hummingbird Optimization (AHA) สำหรับการออกแบบตัวกรอง FIR ประเภท low pass และ high pass (LPF และ HPF) ทางเลือกการปรับปรุง AHA จะจำลองทักษะการบินและกลยุทธ์การหาอาหารของนกแก้วผีเสื้อ โดยใช้ AHA algorithm เพื่อสร้างชุดของค่าความเสถียรที่ปรับแต่งให้ได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ ผลลัพธ์ที่ได้จาก AHA algorithm ถูก

เปรียบเทียบกับ PSO, BFO, GWO, และ BAT algorithms ตามด้าน passband ripples (PBR), stopband attenuation (SBA), stopband ripples (SBR), และ transition width (TW)

Yousif, A.J., Ahmed, G.J., and Abbood, A.S., นำเสนอวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบ FIR โดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบฮิวริสติกเชิงวิวัฒนาการที่เรียกว่า การปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพการรวมตัวของอนุภาคที่ปรับปรุงโดยน้ำหนัก (WIPSO) เป็นการพัฒนามาจากวิธีกลุ่มอนุภาค ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอแนะนำไปเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการปรับแต่งการค้นหาอื่น ๆ อีกสองอัลกอริทึม ได้แก่ Genetic Algorithm มาตรฐาน (GA) และ Particle Swarm Optimization (PSO) แบบเดิม ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม WIPSO ที่เสนอนั้นดีกว่า GA และ PSO ในแง่ของความแม่นยำในการตอบสนองขนาดและความเร็วในการบรรจบกันสำหรับการออกแบบตัวกรอง FIR ความถี่สูงผ่าน

Mandal, S., Ghoshal, S. P., Mukherjee, P., Sengupta, D., Kar, R., and Mandal, D., นำเสนอวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบ FIR แบบเฟสเชิงเส้นโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคแบบปรับปรุง (IPSO) บทความนี้นำเสนอการใช้ตัวกรองความถี่สูง FIR ผลการจำลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จาก อัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับ เช่น อัลกอริทึม Park และ McClellan (PM) และ อัลกอริทึมวิวัฒนาการ เช่น อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) และการปรับให้เหมาะสมของฝูงอนุภาค (PSO) ผลลัพธ์นี้ให้เหตุผลว่าแนวทางการ ออกแบบตัวกรองที่เหมาะสมที่สุดที่เสนอโดยใช้ IPSO มีประสิทธิภาพดีกว่า PM, RGA, PSO ในด้านความแม่นยำ ของตัวกรองที่ออกแบบ รวมถึงความเร็วของคอนเวอร์เจนซ์และคุณภาพของโซลูชัน

Saha, S.K., Kar, R., Mandal, T.I., Kumar, N., and Ghoshal, S.P., นำเสนอวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบ FIR เฟสเชิงเส้น โดยใช้ปัจจัยการจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพการจับกลุ่มอนุภาค และวิธีน้ำหนักความเฉื่อยและการกลายพันธุ์ของเวฟเล็ต (PSOCFIWA-WM) ในขั้นตอนการออกแบบ อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการที่นำมาเปรียบเทียบ คือ อัลกอริทึมรหัสพันธุกรรม (RGA), การเพิ่มประสิทธิภาพการจับกลุ่มอนุภาค (PSO), PSO พร้อมปัจจัยการหดตัวและน้ำหนักเฉื่อย (PSOCFIWA) และ PSOCFIWA-WM ที่เสนอได้ถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบเปรียบเทียบของตัวกรองความถี่สูงผ่านแบบ FIR เฟสเชิง เส้น การเปรียบเทียบผลการจำลองเผยให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพการจับกลุ่มอนุภาคและวิธีน้ำหนักความเฉื่อย และการกลายพันธุ์ของเวฟเล็ต (PSOCFIWA-WM) ดีกว่าเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพอื่นๆ สำหรับโซลูชันของการ ออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านแบบ FIR เฟสเชิงเส้น

Kumari, N., and Jaglan, P., นำเสนอตัวกรอง FIR ความถี่ต่ำผ่านเฟสเชิงเส้นได้รับการวิเคราะห์โดยวิธีการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมการปรับให้ เหมาะสมของอนุภาค (PSO) การจำลองระหว่างเทคนิคทั่วไประหว่างการเพิ่มประสิทธิภาพโดยกลุ่มอนุภาค (PSO) ผลการจำลอง



บ่งชี้อย่างชัดเจนว่าการออกแบบตัวกรองโดยใช้กลุ่มอนุภาค (PSO) ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในทางของแบนด์พาส และ มีความสามารถที่ดีที่สุดในการบรรจบกันได้อย่างรวดเร็ว

Karaboga, N., and Cetinkaya, B., ได้นำเสนอ การออกแบบตัวกรอง FIR ดิจิทัลโดยใช้ อัลกอริทึม วิวัฒนาการที่แตกต่าง (DE) จากผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมทางพันธุกรรม(GA) และ อัลกอริทึม วิวัฒนาการที่แตกต่าง (DE) อัลกอริทึม DE จะมีโครงสร้างที่เรียบง่ายกว่า GA แต่สำหรับขนาดประชากร อัลกอริทึม DE แสดงประสิทธิภาพที่คล้ายคลึงกันในแง่ของการตอบสนองขนาด ดังนั้น อัลกอริทึม DE จึงประสบความสำเร็จใน การออกแบบตัวกรอง FIR พร้อมการตอบสนองตามขนาดที่ต้องการ และยังพบตัวกรองที่เหมาะสมได้เร็วกว่า GA มาก ดังนั้นจึงสามารถใช้ อัลกอริทึม DE ในการออกแบบตัวกรอง FIR แบบดิจิทัลได้ดีกว่า

Severino, A.G., Linhares, L.L., and de Araújo, F.M., ได้เสนอการออกแบบตัวกรอง FIR ความถี่ต่ำผ่านโดย เพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีกกลุ่มอนุภาค (PSO) และ Bat (BA) จากการทดลอง ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม เปรียบเทียบระหว่าง BA และ PSO สำหรับการเปรียบเทียบนี้ จะพิจารณาตัวกรองผ่านแถบและแถบหยุดตลอด คลื่น ความกว้างของการเปลี่ยนผ่าน และข้อมูลทางสถิติ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบตัว กรองที่เสนอโดยใช้อัลกอริทึม BA มี ประสิทธิภาพเหนือกว่า PSO

จากการศึกษาค้นคว้าบทความต่างๆ ในวารสารทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ นำเสนอการออกแบบตัวกรองความถี่ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการตอบสนองความเร็วในการบรรจบกันเท่านั้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคฮิวริสติกเชิงวิวัฒนาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ซึ่งยังไม่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหา พารามิเตอร์ตัวกรองความถี่ เป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโลบหลัก (Main lobe) และโลบรอง (Side lobe) ให้มีขนาดลดลง, ปัจจัยการรั่วไหลมีค่าลดลง และมีการตอบสนองขนาดและความเร็วใน การบรรจบกัน รวมถึงสามารถพัฒนาสมรรถนะการออกแบบตัวกรองความถี่ให้ดียิ่งขึ้น และยัง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาในตัวกรองความถี่อื่นๆ ในอนาคตได้

พูน ปณ จิต ชีเว

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งหลังจากที่ได้ศึกษาจากเนื้อหาในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย และบทที่ 2 เป็นทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฟุ้ง โดยในบทนี้จะนำเสนอเนื้อหาในส่วนของการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

- 3.1 เครื่องมือ และโปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 ขั้นตอนการออกแบบ
- 3.3 การเปรียบเทียบกราฟแสดงผลการทดลอง
- 3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.5 แผนการดำเนินการและระยะเวลาทำการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือ และโปรแกรมในการวิจัย

##### 3.1.1 โปรแกรม MATLAB

เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่มีสภาพแวดล้อมการทำงานเชิงโต้ตอบ ซึ่งสามารถคำนวณคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วมากกว่าภาษาคอมพิวเตอร์สมัยก่อน เช่น ภาษา C , ภาษา C++ หรือภาษา Fortran MATLAB เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้สำหรับคำนวณเชิงตัวเลข Numerical Computing แสดงผลกราฟฟิก และเขียนแอปพลิเคชัน ทำให้เราสามารถคำนวณผลลัพธ์ พัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลอง และแอปพลิเคชันได้ง่ายและรวดเร็วมาก ภายในโปรแกรม MATLAB ประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Toolbox กลุ่มฟังก์ชันสำเร็จรูปในแต่ละสาขาวิชา และฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้การวิเคราะห์ทำได้หลากหลายวิธี พร้อมกับหาคำตอบได้รวดเร็ว เราสามารถนำโปรแกรม MATLAB ไปประยุกต์ใช้งานได้หลายสาขา ทั้งการประมวลผลสัญญาณ , การสื่อสาร , การประมวลผลภาพและวิดีโอ , ระบบควบคุม , การวัดและควบคุม , การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ , การคำนวณทางชีววิทยา เป็นต้น

การทำงานสามารถทำงานได้ทั้งในลักษณะของการติดต่อโดยตรง คือการเขียนคำสั่งเข้าไปที่ละคำสั่ง เพื่อประมวลผล หรือสามารถที่จะรวบรวมชุดคำสั่งนั้นเป็นโปรแกรม ที่สำคัญคือข้อมูลทุกตัวจะถูกเก็บในลักษณะของแถวลำดับ คือในแต่ละตัวแปรจะได้รับการแบ่งเป็นส่วนย่อย ซึ่งการใช้ตัวแปรเป็นแถวลำดับเราไม่จำเป็นต้องจองมิติเหมือนกับการเขียนโปรแกรมทั่วไป ซึ่งทำให้เรา

สามารถที่จะแก้ปัญหาของตัวแปรที่อยู่ในลักษณะของเมทริกซ์ และเวกเตอร์ได้โดยง่าย ซึ่งทำให้เราลดเวลาการทำงานลงได้อย่างมากเมื่อเทียบกับการเขียนโปรแกรมโดยภาษา C หรือภาษา Fortran

ความสามารถหลักของ MATLAB ที่เหมาะสมกับการทำงานทางด้านวิศวกรรม

1. MATLAB เป็นโปรแกรมเพื่อการคำนวณและแสดงผลได้ทั้งตัวเลขและรูปภาพซึ่งมีประสิทธิภาพสูง
2. MATLAB จะควบคุมการทำงานด้วยชุดคำสั่งและยังสามารถรวบรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรมได้อีกด้วย
3. MATLAB มีฟังก์ชันที่เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมพื้นฐานมากมาย นอกจากนั้นผู้ใช้อย่างสามารถเขียนฟังก์ชันขึ้นมาใหม่โดยสามารถใช้ประโยชน์จากฟังก์ชันที่มีอยู่แล้วเพื่อให้เหมาะสมกับงานของผู้ใช้แต่ละกลุ่ม
4. ลักษณะการเขียนโปรแกรมจะใกล้เคียงกับการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ที่เราคุ้นเคย จึงง่ายกว่าการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาขั้นสูงเช่น ภาษา C หรือภาษา Fortran เป็นต้น
5. MATLAB มีความสามารถในการเขียนกราฟและรูปภาพทั้ง 2 มิติและ 3 มิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ
6. MATLAB สามารถทำ Dynamic Link กับโปรแกรมอื่น ๆ เช่น Word, Excel เป็นต้น ที่ทำงานอยู่บน windows
7. MATLAB มี toolbox หรือชุดฟังก์ชันพิเศษ สำหรับผู้ใช้ที่ต้องการใช้งานเฉพาะทางหรืองานด้านวิศวกรรมขั้นสูง

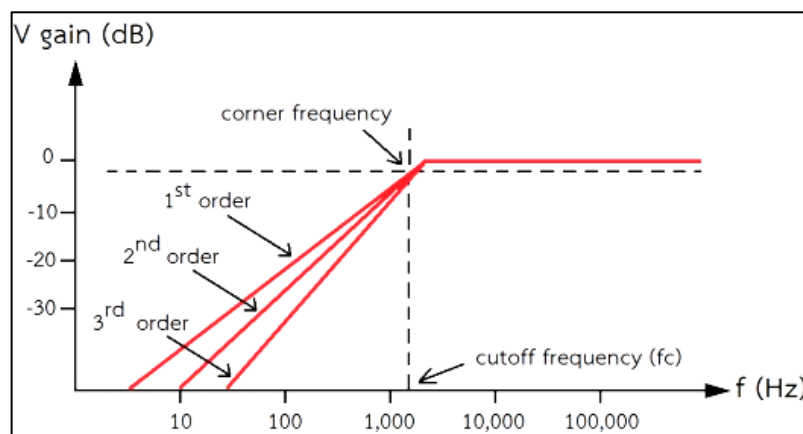
### 3.1.2 ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window)

หน้าต่าง Kaiser เป็นค่าประมาณของหน้าต่าง ซึ่งอัตราส่วนของพลังงานของกลีบหลักต่อพลังงานของกลีบข้างถูกขยายให้ใหญ่ สำหรับหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาวเฉพาะ พารามิเตอร์  $\beta$  จะควบคุมการลดทอนกลีบข้างสัมพัทธ์ สำหรับ  $\beta$  ที่กำหนด การลดทอนกลีบข้างสัมพัทธ์ได้รับการแก้ไขตามความยาวของหน้าต่าง คำสั่ง `kaiser(n, beta)` คำนวณความยาว n หน้าต่าง Kaiser พร้อมพารามิเตอร์เบต้า

เมื่อ  $\beta$  เพิ่มขึ้น การลดทอนกลีบข้างสัมพัทธ์จะลดลงและความกว้างของกลีบหลักเพิ่มขึ้น ภาพหน้าจอนี้แสดงให้เห็นว่าการลดทอนกลีบข้างสัมพัทธ์ยังคงเหมือนเดิม สำหรับพารามิเตอร์  $\beta$  คงที่ เนื่องจากความยาวแตกต่างกัน

### 3.1.3 ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High pass filter)

high pass filter (ความถี่สูงกว่าผ่านได้) บางครั้งอาจจะเรียกว่าวงจร Low-cut filter สำหรับ ความถี่วิทยุ และ bass-cut filter สำหรับวงจรขยายเสียง



ภาพประกอบที่ 3.41 ตัวกรองความถี่สูง

วงจรนี้จะยอมให้ความถี่ที่สูงกว่ากำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่าจะโดนจับลง กราฟดูจากรูปจะเห็นว่า C ต่ออนุกรมกับวงจร ส่วน L ต่อขนานกับวงจร เมื่อป้อนความถี่ต่ำกว่าเข้ามา C จะมีค่า  $X_C$  สูง ทำให้สัญญาณผ่านไปได้น้อย ส่วน L จะมีค่า  $X_L$  น้อย ทำให้สัญญาณที่ผ่านมาจาก C ลงกราวด์ได้หมด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้น C จะมีค่า  $X_C$  ลดลง สัญญาณจะผ่านได้มากขึ้น ส่วน L จะมีค่า  $X_L$  มากขึ้น สัญญาณก็จะลงกราวด์น้อยลง สัญญาณที่ออกไปยัง Output ก็มากขึ้น จนถึงระดับความแรงของสัญญาณประมาณ 70.7 % ของความแรงสูงสุด ระดับนี้เองที่เราเรียกว่า ช่วงความถี่ Cut off เมื่อความถี่สูงกว่า ความถี่ นี้ C จะยอมให้สัญญาณผ่านได้สะดวกและค่า  $X_L$  จะต้านสัญญาณไม่ให้ลงกราวด์ ความถี่จึงผ่านไปที่จุด Output ได้ทั้งหมด

#### 3.1.4 วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm; BA)

เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาน้ำหวานของผึ้ง ดำเนินงานผ่านผึ้ง โดยแบ่งชนิดของผึ้ง ออกเป็น 2 ประเภท คือ ผึ้งสอดแนม (Scout bee) และ ผึ้งงาน (Employee bee) เพื่อหาคำตอบ โดยสมมติว่าคำตอบคือ แหล่งน้ำหวาน หน้าที่ของผึ้งสอดแนมคือ ค้นหาแหล่งน้ำหวานแบบสุ่มในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ (Search space) เมื่อผึ้งสอดแนมค้นหาคำตอบได้ ก็จะบินกลับมาที่รังผึ้ง เพื่อสื่อสารกับผึ้งตัวอื่นๆ ภายในรังผึ้ง การสื่อสารของผึ้งจะใช้วิธีการเดินลักษณะต่างๆ เพื่อบอกปริมาณของน้ำหวาน ทิศทางของแหล่งน้ำหวาน จากนั้นผึ้งงานก็จะไปทำหน้าที่ขนน้ำหวานในแหล่งน้ำหวาน โดยจำนวนผึ้งงานจะแปรตามปริมาณ น้ำหวานและระยะทาง

### 3.2 ขั้นตอนการออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฟูง์ซิง โดยวิธีการศึกษาจะศึกษาข้อมูลจากบทความวิทยานิพนธ์ งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับขั้นตอนในการออกแบบมีดังนี้

#### 3.2.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์

|                    |          |
|--------------------|----------|
| Beta ( $\beta$ )   | 0,2,4,6  |
| Filter order       | 60       |
| Cutoff frequency   | 48000 Hz |
| Sampling frequency | 10800 Hz |

สำหรับการออกแบบ Filter order ควรคำนึงถึงคุณสมบัติของความสมมาตร ซึ่งมี 4 ชนิดด้วยกันคือ

1. สมมาตรปกติ N เป็นเลขคี่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองความถี่ในทุกรูปแบบ
2. สมมาตรปกติ N เป็นเลขคู่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองความถี่ต่ำ (LPF) กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF)
3. สมมาตรตรงข้าม N เป็นเลขคี่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF)
4. สมมาตรตรงข้าม N เป็นเลขคู่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองความถี่สูง (HPF) กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF) ดังนั้น N ในที่นี้เรากำหนดให้มีค่าเท่ากับ 60 หรือใช้คุณสมบัติของสมมาตรชนิดที่ 4 ถ้ากำหนดให้มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ จะทำให้ความกว้างของแถบเปลี่ยนมีความกว้างมากขึ้น

3.2.2 นำค่า Beta ( $\beta$ ) และค่า Filter order (N) ที่กำหนดไว้มาทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window) และทำการทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter)

| ตัวแปร   | ความหมาย                                                               | พารามิเตอร์ |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-------------|
| $n$      | จำนวนฝั่งสอดแนม                                                        | 50          |
| $m$      | จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานจากการหาของฝั่งสอดแนม $n$ ตัว       | 25          |
| $e$      | จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมากที่สุด จากที่เลือกแล้ว $m$ แหล่ง | 10          |
| $n_{ep}$ | จำนวนฝั่งงานที่กำหนด ให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน $e$ แหล่ง                  | 20          |

| ตัวแปร   | ความหมาย                                            | พารามิเตอร์ |
|----------|-----------------------------------------------------|-------------|
| $n_{sp}$ | จำนวนฟังก์ชันที่กำหนด ให้ไปหาน้ำหวานที่ $m-e$ แหล่ง | 30          |
| $n_{gh}$ | ขนาดของขอบเขตในการค้นหาของแหล่งน้ำหวานแต่ละแหล่ง    | 0.5         |
| NC       | จำนวนครั้งการทำซ้ำ                                  | 15          |

### 3.2.3 กำหนดค่าพารามิเตอร์วิธีฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 1 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n=50$  ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็น คำตอบที่เป็นไปได้ ต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC=0$

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม โดยจะจัดเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ซึ่งจะทำให้สามารถเลือกคำตอบที่ดีได้ง่ายขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบที่มีผลดีที่สุด  $m=25$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 4 คัดแยกคำตอบที่ดีที่สุด  $m=25$  คำตอบ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด  $e=10$  คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ด้อยลงมา  $m-e=15$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขอบเขตในการค้นหาคำตอบข้างเคียงของบริเวณที่ได้คำตอบที่ดีที่สุด  $m=25$

คำตอบ โดยกำหนดขอบเขตของการค้นหาแหล่งน้ำหวานในแต่ละแหล่งเริ่มต้น  $n_{gh} = 0.5$

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน  $n_{ep}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $e$  คำตอบ และ ผึ้งงานจำนวน  $n_{sp}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $m-e$  คำตอบ

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไขให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC=NC+1$  โดยเงื่อนไขคือ จำนวนรอบสูงสุด (Maximum iteration) ตามที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n-m$  ตัว ค้นหาคำตอบใหม่ แล้วกลับไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด

3.2.3 สร้างตารางบันทึกผลการทดสอบการเปรียบเทียบข้อมูล โดยข้อมูลที่นำมาบันทึกจะถูกนำมาวิเคราะห์ผล

#### 3.2.3.1 สร้างตารางบันทึกผลโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชัน Kaiser window





3.2.4 นำข้อมูลจากการวิเคราะห์ทั้งฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window), โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter) และ โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่านโดยใช้ขั้นตอนวิธีฟูงฟ์ง นำมาเปรียบเทียบกับและวิเคราะห์เพื่อหาความกว้างของกลีบหลัก และการลดทอนของกลีบข้าง

### 3.3 การเปรียบเทียบกราฟแสดงผลการทดลอง

เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window), โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter) และ โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่านโดยใช้ขั้นตอนวิธีฟูงฟ์ง โดยค่าที่นำมาเปรียบเทียบคือ ปัจจัยการรั่วไหล (Leakage Factor), ความกว้างของโลบหลัก (Main lobe width) และการลดทอนของโลบรอง (Relative side lobe Attenuation dB)

### 3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฟูงฟ์ง มีดังต่อไปนี้

3.4.1 ผู้วิจัยทำการหาข้อมูลในเรื่องการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านจากหนังสือที่ถูกตีพิมพ์ในประเทศ และงานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ในต่างประเทศ

3.4.2 ผู้วิจัยทำการหาข้อมูลในเรื่องการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟูงฟ์งจากงานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ในประเทศ และงานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ในต่างประเทศ

3.4.3 ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ตรวจสอบความถูกต้องของงานทดลองเพื่อนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลองต่อไป

### 3.5 แผนการดำเนินการและระยะเวลาทำการวิจัย

| วัตถุประสงค์                                                                                 | แผนงานวิจัย                                              | 2566 |     |      |      |     |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------|-----|------|------|-----|------|
|                                                                                              |                                                          | ม.ค  | ก.พ | มี.ค | เม.ย | พ.ค | มิ.ย |
| 1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ โปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ และตัวกรองความถี่สูง | 1.1 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบตัวกรองความถี่สูง                 |      |     |      |      |     |      |
|                                                                                              | 1.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ |      |     |      |      |     |      |

### 3.5 แผนการดำเนินการและระยะเวลาทำการวิจัย (ต่อ)

| วัตถุประสงค์                                                                                                                                                                                                  | แผนงานวิจัย                                                                          | เทอมที่ 2 / 2566 |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                                                                                                                                                               |                                                                                      | ก.ค              | ส.ค | ก.ย | ต.ค | พ.ย | ธ.ค |
| 2. ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm; BA)                                                                                                                                                 | 2.1 ทำการศึกษาทฤษฎีวิธีฝูงผึ้ง                                                       |                  |     |     |     |     |     |
| 3. ทำการออกแบบระหว่างโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window), โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter) และ โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่านโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง | 3.1 ออกแบบและจำลองโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window)             |                  |     |     |     |     |     |
|                                                                                                                                                                                                               | 3.2 ออกแบบและจำลองโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter)          |                  |     |     |     |     |     |
|                                                                                                                                                                                                               | 3.3 ออกแบบและจำลองโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่านโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง |                  |     |     |     |     |     |
| 4. สรุปผลการทดลอง                                                                                                                                                                                             | 4.1 ทำการสรุปผลการทดลอง                                                              |                  |     |     |     |     |     |
|                                                                                                                                                                                                               | 4.2 จัดทำรายงานผลการวิจัย                                                            |                  |     |     |     |     |     |

พหุบัณฑิต ชีวะ

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลหลังจากที่ได้ดำเนินการวิจัยแล้ว ได้นำมาออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้งตามขั้นตอนที่สร้างขึ้นเป็นลำดับ จนได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลออกมา ซึ่งต้องเป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดไว้ซึ่งขั้นตอนที่ทำให้เกิดผลการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้

#### 4.1 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

4.1.1.1 จำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) เพื่อจำลองหาโลบหลัก (Main lobe), ระดับของโลบรอง (Side lobe) และ ปัจจัยการรั่วไหล

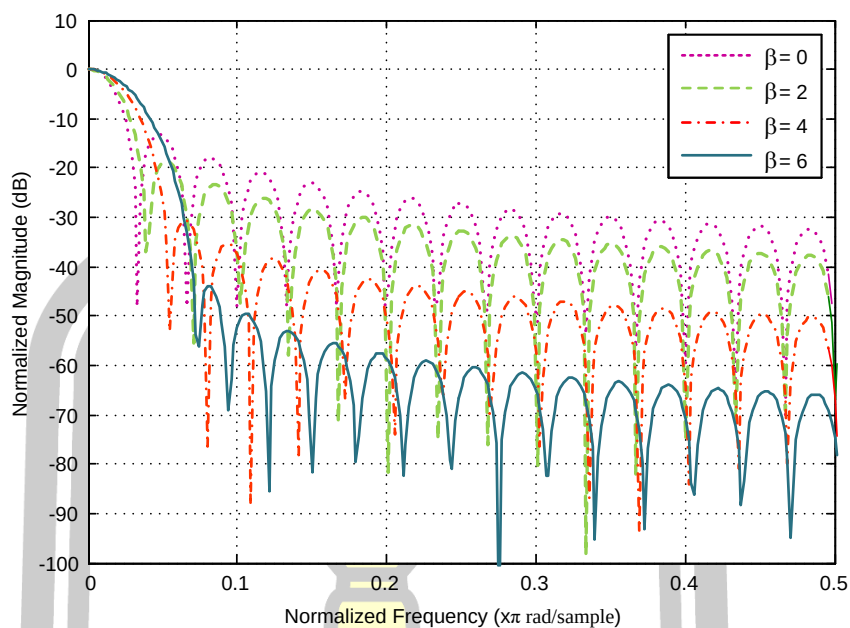
4.1.1.2 จำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter) เพื่อจำลองหาโลบหลัก (Main lobe), ระดับของโลบรอง (Side lobe) และ ปัจจัยการรั่วไหล

4.1.1.3 จำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง (Bee algorithm) เพื่อจำลองหาโลบหลัก (Main lobe), ระดับของโลบรอง (Side lobe) และ ปัจจัยการรั่วไหล

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

ผลการทดลองปรากฏให้เห็นว่าเมื่อกำหนดให้ค่าเบต้าเพิ่มขึ้น ความกว้างของโลบหลัก (Main lobe) จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ระดับของโลบรอง (Side lobe) จะมีค่าลดลง และเปอร์เซ็นต์ปัจจัยการรั่วไหลจะมีค่าลดลง



ภาพประกอบที่ 4.42 การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

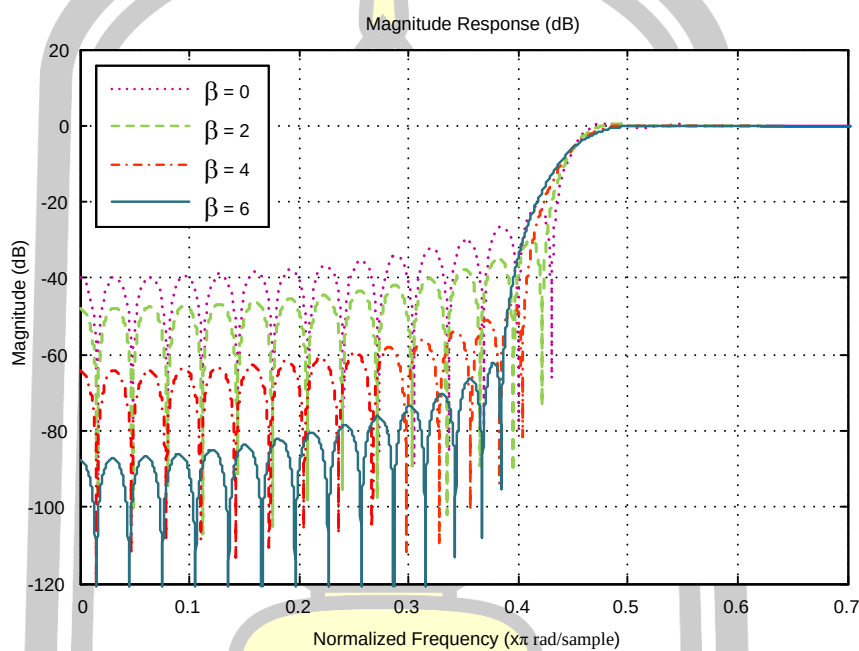
ตาราง 4.1 ผลการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

| Variable parameter beta | Length of Window function | Time Domain |          | Frequency Domain      |                                |                |
|-------------------------|---------------------------|-------------|----------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
|                         |                           | Max. Amp    | Min. Amp | Mainlobe width (-3dB) | Relative side lobe Attenuation | Leakage Factor |
| 0                       | 60                        | 1           | 1        | 0.027344              | -13.3 dB                       | 9.17 %         |
| 2                       |                           |             | 0.44     | 0.031250              | -18.7 dB                       | 2.39 %         |
| 4                       |                           |             | 0.09     | 0.039063              | -30.6 dB                       | 0.11 %         |
| 6                       |                           |             | 0.01     | 0.046875              | -44.1 dB                       | 0 %            |

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า Beta = 0, filter order = 60 โลบลึก (Mainlobe width) จะมีค่า 0.027344, ระดับของโลบรอง (Relative Sidelobe attenuation) จะมีค่า -13.3 dB และ ปัจจัยการรั่วไหล (Leakage Factor) จะมีค่า 9.17% แต่ในขณะที่เพิ่มค่า Beta = 6 และ filter order = 60 โลบลึกจะมีค่า 0.046875, ระดับของโลบรองจะมีค่า -44.1 dB และ ปัจจัยการรั่วไหล (Leakage Factor) จะมีค่า 0%

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter)

จากผลการทดลองปรากฏให้เห็นว่าเมื่อกำหนดค่าเบต้า ( $\beta$ ) เพิ่มขึ้น ความกว้างของโลบหลัก (Main lobe) จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ระดับของโลบรอง (Side lobe) จะมีค่าลดลง



ภาพประกอบที่ 4.43 การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรอง High pass FIR

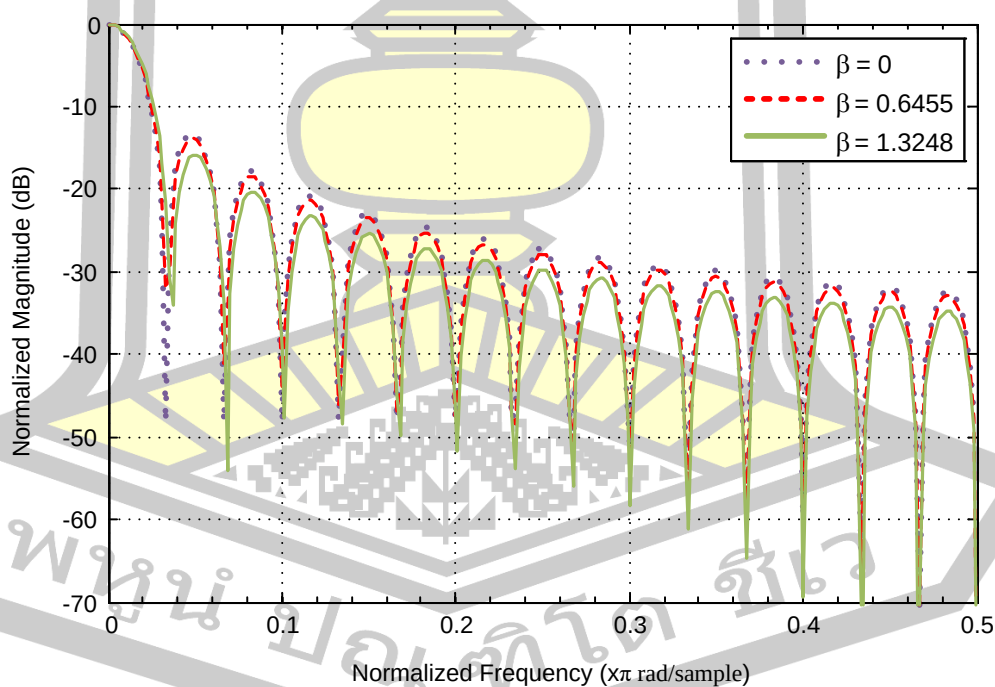
ตาราง 4.2 ผลการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรอง High pass FIR

| Variable parameter<br>beta | Length of Window<br>function | Transition bandwidth | Mainlobe width<br>(-3dB) | Sidelobe attenuation (dB) |              |
|----------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|
|                            |                              |                      |                          | Sidelobe max              | Sidelobe min |
| 0                          | 60                           | 0.0240833            | 0.4571544                | -21.78241                 | -39.92366    |
| 2                          |                              | 0.0345506            | 0.4589907                | -30.16711                 | -47.77296    |
| 4                          |                              | 0.0560413            | 0.4619280                | -46.56368                 | -64.34294    |
| 6                          |                              | 0.0782670            | 0.4644597                | -62.14711                 | -87.45897    |

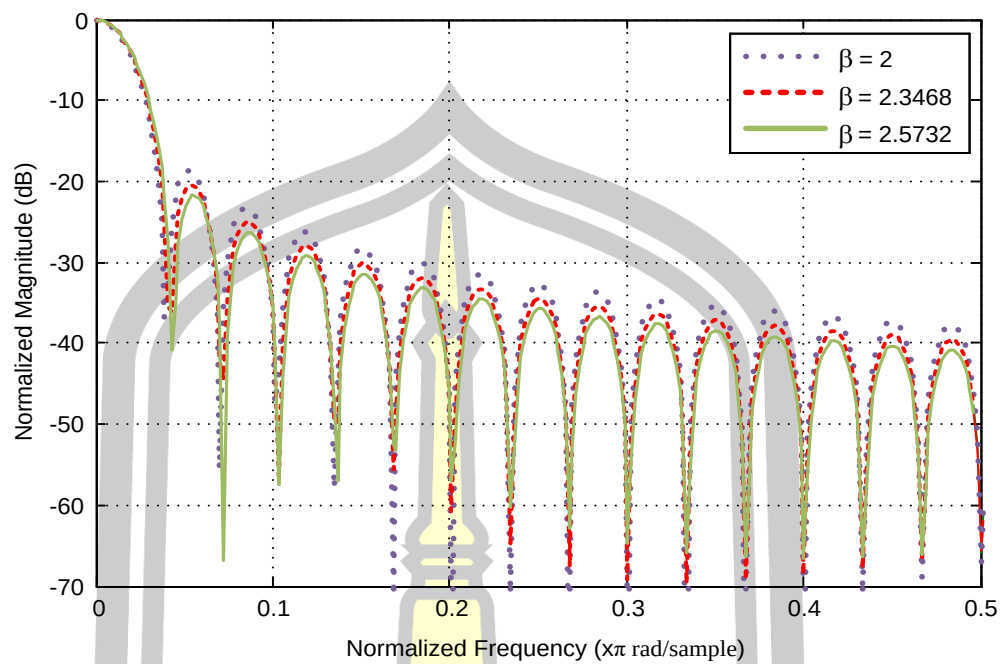
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า  $\beta = 0$ , filter order = 60 โลบลึก (Mainlobe width) จะมีค่า 0.4571544, ระดับของโลบรองสูงสุด (Sidelobe attenuation max) จะมีค่า -21.78241 dB และ การเปลี่ยนของแบนด์วิดธ์อยู่ที่ 0.0240833 แต่ในขณะที่เพิ่มค่า  $\beta = 6$  โลบลึก (Mainlobe width) จะมีค่า 0.4644597, ระดับของโลบรองสูงสุด (Sidelobe attenuation max) จะมีค่า -62.14711 dB และ การเปลี่ยนของแบนด์วิดธ์อยู่ที่ 0.0782670

4.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง (Bee algorithm) แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แบบคือ

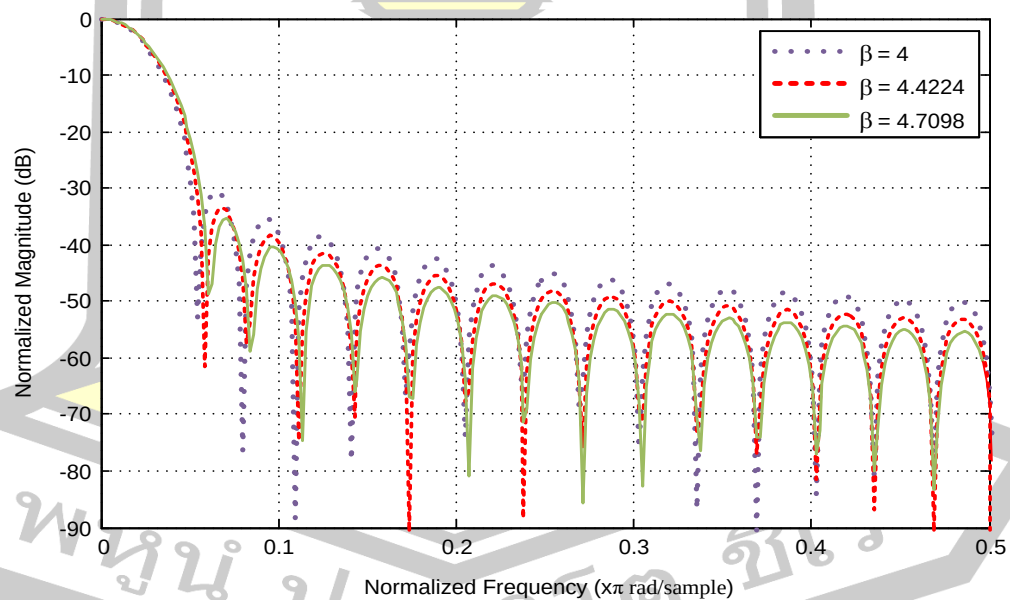
4.2.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ (Kaiser Window) โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง (Bee algorithm) ปรากฏให้เห็นว่าจากค่าเบต้าที่กำหนดไว้ (0,2,4,6,8) เมื่อค่าเบต้าเพิ่มขึ้น ความกว้างของโลบลึก (Main lobe) จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ระดับของโลบรอง (Side lobe) มีค่าลดลง แต่เมื่อนำขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้งเข้ามาเพื่อหาค่าเบต้า ( $\beta$ ) ที่ดีที่สุด ที่อยู่ระหว่าง (0,2,4,6,8) แสดงให้เห็นเมื่อค่าเบต้าเพิ่มขึ้น ความกว้างของโลบลึก (Main lobe) มีค่าเท่าเดิม แต่ระดับของโลบรอง (Side lobe) มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.6 และตารางที่ 4.3



ภาพประกอบที่ 4.44 ผลการตอบสนองหน้าต่างโคเชอร์ที่  $\beta=0$ ,  $\beta$  (Bee algorithm) = 0.6455,  $\beta$  (Bee algorithm) = 1.3248 ที่ filter order=60

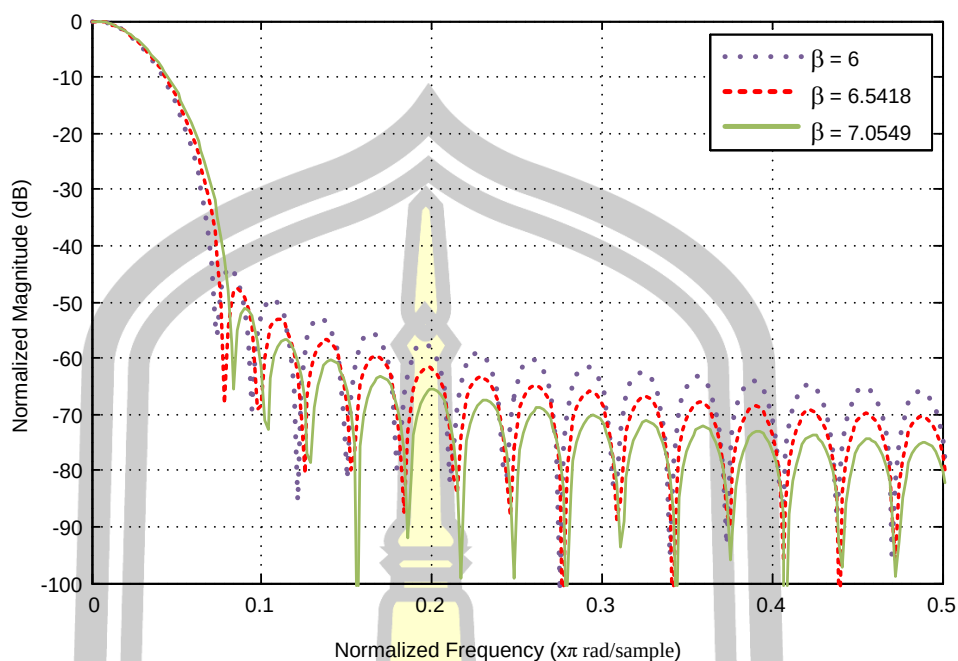


ภาพประกอบที่ 4.45 ผลการตอบสนองหน้าต่างโคเซอร์ที่  $\beta = 2$ , bata (Bee algorithm) = 2.3468,  $\beta$  (Bee algorithm) = 2.5732 ที่ filter order=60



ภาพประกอบที่ 4.46 ผลการตอบสนองหน้าต่างโคเซอร์ที่  $\beta = 4$ , bata (Bee algorithm) = 4.4224,  $\beta$  (Bee algorithm) = 4.7098 ที่ filter order=60





ภาพประกอบที่ 4.47 ผลการตอบสนองหน้าต่างโคเชอร์ที่  $\beta = 6$ ,  $\beta$  (Bee algorithm) = 6.5418,  $\beta$  (Bee algorithm) = 7.0549 ที่ filter order=60

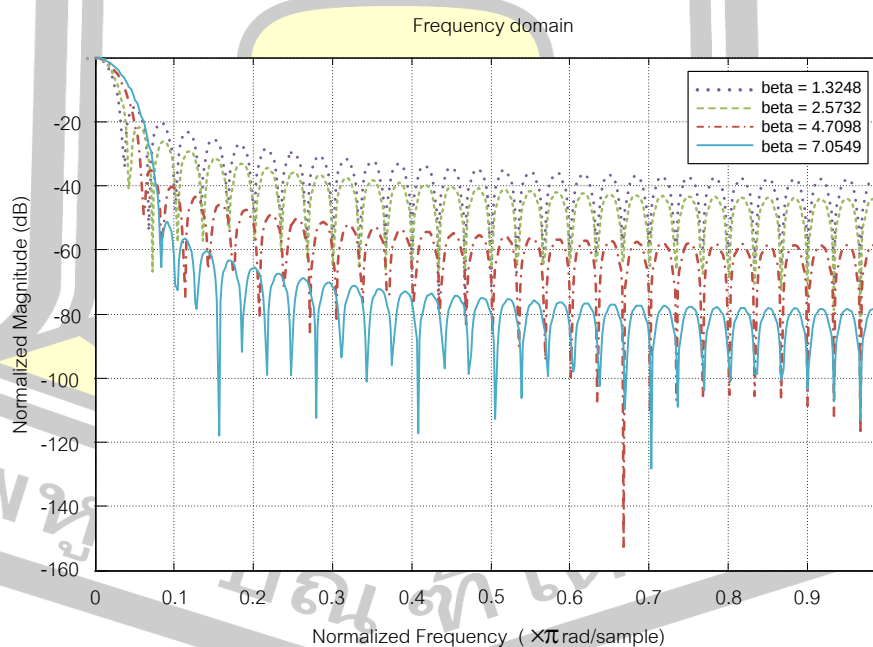
ตาราง 4.3 การเปรียบเทียบฟังก์ชัน Kaiser Window โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้ง (Bee algorithm)

| Variable parameter<br>beta | Length of Window function | Time Domain |         | Frequency Domain      |                                |                |
|----------------------------|---------------------------|-------------|---------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
|                            |                           | Max Amp     | Min Amp | Mainlobe width (-3dB) | Relative side lobe Attenuation | Leakage Factor |
| 0                          | 60                        | 1           | 1       | 0.027344              | -13.3 dB                       | 9.17 %         |
| 0.6455                     |                           |             | 0.90    |                       | -13.9 dB                       | 7.9 %          |
| 1.3248                     |                           |             | 0.67    |                       | -15.8 dB                       | 4.96 %         |
| 2                          |                           |             | 0.44    |                       | -18.7 dB                       | 2.39 %         |
| 2.3468                     |                           |             | 0.34    |                       | -20.5 dB                       | 1.51 %         |
| 2.5732                     |                           |             | 0.29    |                       | -21.7 dB                       | 1.1 %          |
| 4                          |                           |             | 0.09    |                       | -30.6 dB                       | 0.11 %         |
| 4.4224                     |                           |             | 0.06    |                       | -33.4 dB                       | 0.05 %         |
| 4.7098                     |                           |             | 0.03    | 0.039063              | -35.3 dB                       | 0.03 %         |

ตาราง 4.3 การเปรียบเทียบฟังก์ชัน Kaiser Window โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้ง (Bee algorithm)(ต่อ)

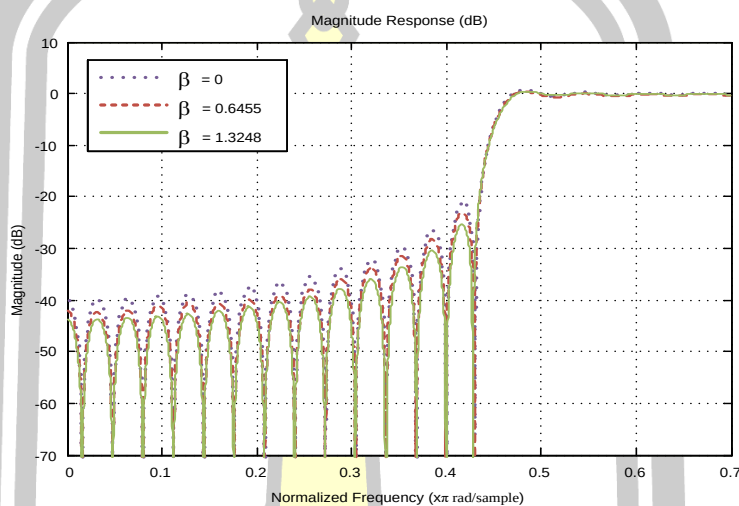
| Variable parameter<br>beta | Length of Window function | Time Domain |         | Frequency Domain      |                                |                |
|----------------------------|---------------------------|-------------|---------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
|                            |                           | Max Amp     | Min Amp | Mainlobe width (-3dB) | Relative side lobe Attenuation | Leakage Factor |
| 6                          | 60                        | 1           | 0.01    | 0.046875              | -44.1 dB                       | 0 %            |
| 6.5418                     |                           |             | 0.009   |                       | -47.7 dB                       | 0 %            |
| 7.0549                     |                           |             | 0.005   |                       | -51.3 dB                       | 0 %            |

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า Beta = 0, filter order = 60 โลบลึก (Mainlobe width) จะมีค่า 0.027344, ระดับของโลบรอง (Relative Sidelobe attenuation) จะมีค่า -13.3 dB และ ปัจจัยการรั่วไหล (Leakage Factor) จะมีค่า 9.17% แต่ในขณะที่ใช้ขั้นตอนวิธีผึ้ง (Bee algorithm) Beta = 1.3248 และ filter order = 60 โลบลึกจะมีค่า 0.027344 เท่าเดิม, ระดับของโลบรองจะมีค่า -15.8 dB และ ปัจจัยการรั่วไหล (Leakage Factor) จะมีค่า 4.96 %

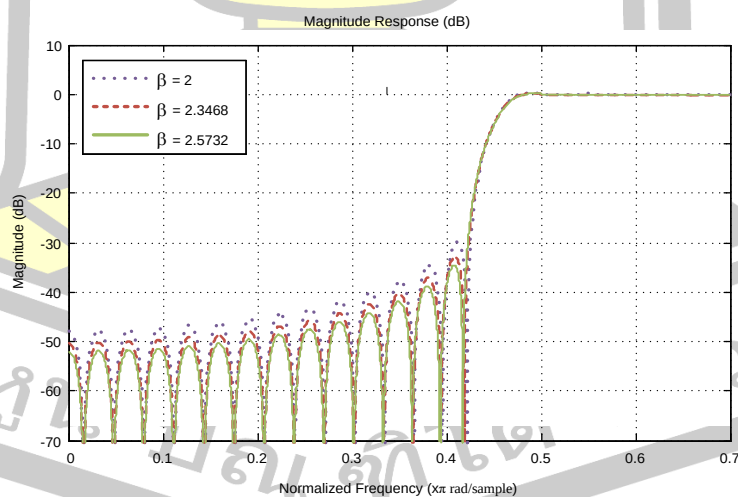


ภาพประกอบที่ 4.48 ผลการตอบสนองหน้าต่างโคเซอร์ โดยค่า beta ที่ดีที่สุดผ่านขั้นตอนวิธีผึ้ง  $\beta = 1.3248$ ,  $\beta = 2.5732$ ,  $\beta = 4.7098$  และ  $\beta = 7.0549$  ที่ filter order = 60

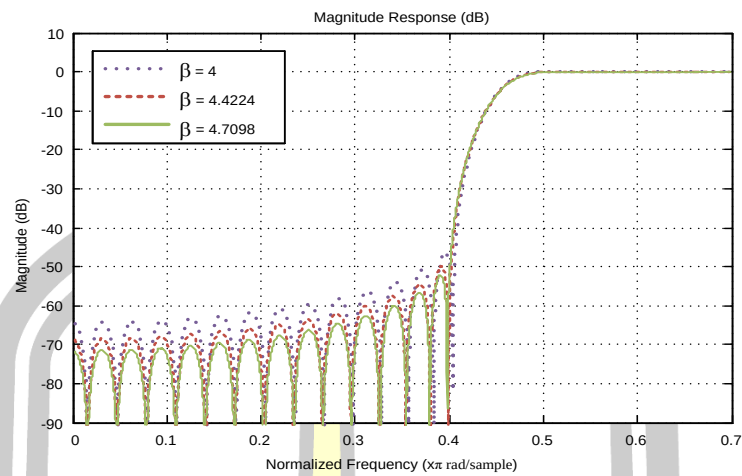
4.2.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB ผ่านตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter) โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง (Bee algorithm) ปรากฏให้เห็นเมื่อนำขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้งเพื่อหาค่าเบต้า ( $\beta$ ) ที่ดีที่สุด ที่อยู่ระหว่าง (0,2,4,6) แสดงให้เห็นเมื่อค่าเบต้าเพิ่มขึ้น ความกว้างของโลบหลัก (Main lobe) มีค่าเท่าเดิม แต่ระดับของโลบรอง (Side lobe) มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.11 และตารางที่ 4.4



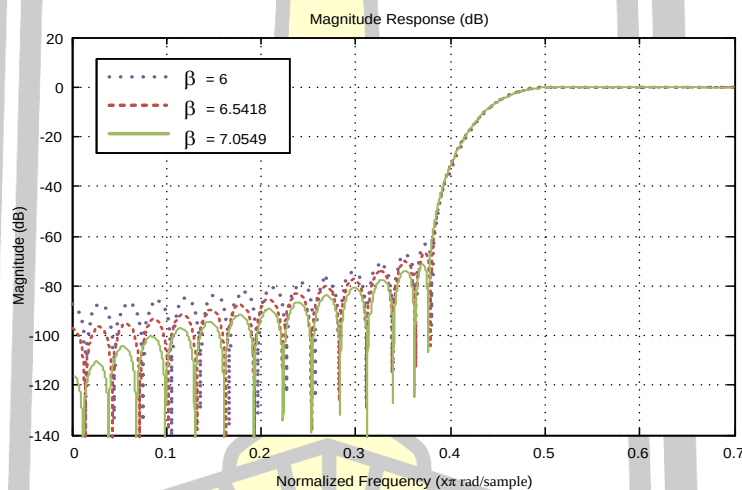
ภาพประกอบที่ 4.49 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่  $\beta = 0$ ,  $\beta$  (Bee algorithm) = 0.6455,  $\beta$  (Bee algorithm) = 1.3248 ที่ filter order = 60



ภาพประกอบที่ 4.50 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่  $\beta = 2$ ,  $\beta$  (Bee algorithm) = 2.3468,  $\beta$  (Bee algorithm) = 2.5732 ที่ filter order=60



ภาพประกอบที่ 4.51 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่  $\beta = 4$ ,  $\beta$  (Bee algorithm) = 4.4224,  $\beta$  (Bee algorithm) = 4.7098 ที่ filter order = 60



ภาพประกอบที่ 4.52 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูงที่  $\beta = 6$ ,  $\beta$  (Bee algorithm) = 6.5418,  $\beta$  (Bee algorithm) = 7.0549 ที่ filter order = 60

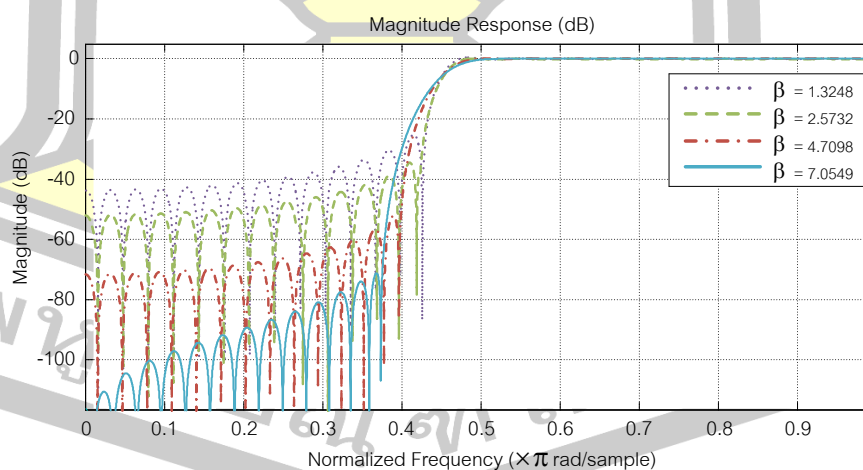
ตาราง 4.4 การเปรียบเทียบตัวกรอง High pass FIR โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้ง (Bee algorithm)

| Variable parameter<br>beta | Length of Window function | Transition bandwidth | Mainlobe width (-3dB) | Sidelobe attenuation (dB) |              |
|----------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|
|                            |                           |                      |                       | Sidelobe max              | Sidelobe min |
| 0                          | 60                        | 0.0240833            | 0.4571544             | -21.78241                 | -39.92366    |
| 0.6455                     |                           | 0.0253061            | 0.4573904             | -22.77106                 | -40.87151    |
| 1.3248                     |                           | 0.0289991            | 0.4580666             | -25.74206                 | -43.67156    |

ตาราง 4.4 การเปรียบเทียบตัวกรอง High pass FIR โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้ง (Bee algorithm) (ต่อ)

| Variable parameter<br>beta | Length of Window function | Transition bandwidth | Mainlobe width (-3dB) | Sidelobe attenuation (dB) |              |
|----------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|
|                            |                           |                      |                       | Sidelobe max              | Sidelobe min |
| 2                          | 60                        | 0.0345506            | 0.4589907             | -30.16711                 | -47.77296    |
| 2.3468                     |                           | 0.0379171            | 0.4595068             | -32.82506                 | -50.24173    |
| 2.5732                     |                           | 0.0402483            | 0.4598480             | -34.65221                 | -51.95864    |
| 4                          |                           | 0.0560413            | 0.4619280             | -46.56368                 | -64.34294    |
| 4.4224                     |                           | 0.0607742            | 0.4625005             | -49.92946                 | -68.51495    |
| 4.7098                     |                           | 0.0699726            | 0.4628778             | -52.16200                 | -71.50985    |
| 6                          |                           | 0.0782670            | 0.4644597             | -62.14711                 | -87.45897    |
| 6.5418                     |                           | 0.0843548            | 0.4650765             | -66.63231                 | -97.01792    |
| 7.0549                     |                           | 0.0902198            | 0.4656385             | -71.17314                 | -110.4903    |

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า Beta = 0, filter order = 60 โลบลึก (Mainlobe width) จะมีค่า 0.4571544, ระดับของโลบรองสูงสุด (Sidelobe attenuation max) จะมีค่า -21.78241 dB และ การเปลี่ยนของแบนด์วิดธ์อยู่ที่ 0.0240833 แต่ในขณะที่ Beta โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้ง (Bee algorithm) Beta = 1.3248, filter order = 60 โลบลึก (Mainlobe width) จะมีค่า 0.4580666, ระดับของโลบรองสูงสุด (Sidelobe attenuation max) จะมีค่า -25.74206 dB และ การเปลี่ยนของแบนด์วิดธ์อยู่ที่ 0.0289991



ภาพประกอบที่ 4.53 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่สูง โดยค่า beta ที่ดีที่สุดผ่านขั้นตอนวิธีผึ้ง beta = 1.3248, beta = 2.5732, beta = 4.7098 และ beta = 7.0549 ที่ filter order = 60

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window), การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter) และ การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง (Bee algorithm) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) และการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter) เมื่อกำหนดค่าเบต้า ( $\beta$ ) เพิ่มขึ้น ความกว้างของโลบหลัก (Main lobe) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ระดับของโลบรอง (Side lobe) มีค่าลดลง แต่เมื่อจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง (Bee algorithm) ปรากฏให้เห็นว่าเมื่อนำขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้งเพื่อหาค่าเบต้า ( $\beta$ ) ที่เหมาะสมที่สุด ที่อยู่ระหว่างเบต้าที่ 0, 2, 4, 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าเบต้าเพิ่มขึ้น ความกว้างของโลบหลัก (Main lobe) มีค่าเท่าเดิม แต่ระดับของโลบรอง (Side lobe) มีค่าลดลง

#### 5.2 อภิปรายผล

การออกแบบตัวกรองความถี่สูง ดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้ง ปรากฏให้เห็นว่าโลบหลัก (Main lobe) ไม่เพิ่มขึ้น ระดับของโลบรอง (Side lobe) มีค่าลดลง และปัจจัยการรั่วไหลลดลง ทำให้สมรรถนะการออกแบบตัวกรองความถี่ดีขึ้น ทำให้เกิดสัญญาณมีความชัดเจน มีการสอดแทรกสัญญาณรบกวนน้อยลง และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาด้านโทรคมนาคม เครื่องมือวัด สายอากาศ ระบบควบคุมทางด้านเครื่องมือแพทย์ และแก้ไขปัญหาในตัวกรองความถี่อื่นๆ ได้อีกในอนาคต

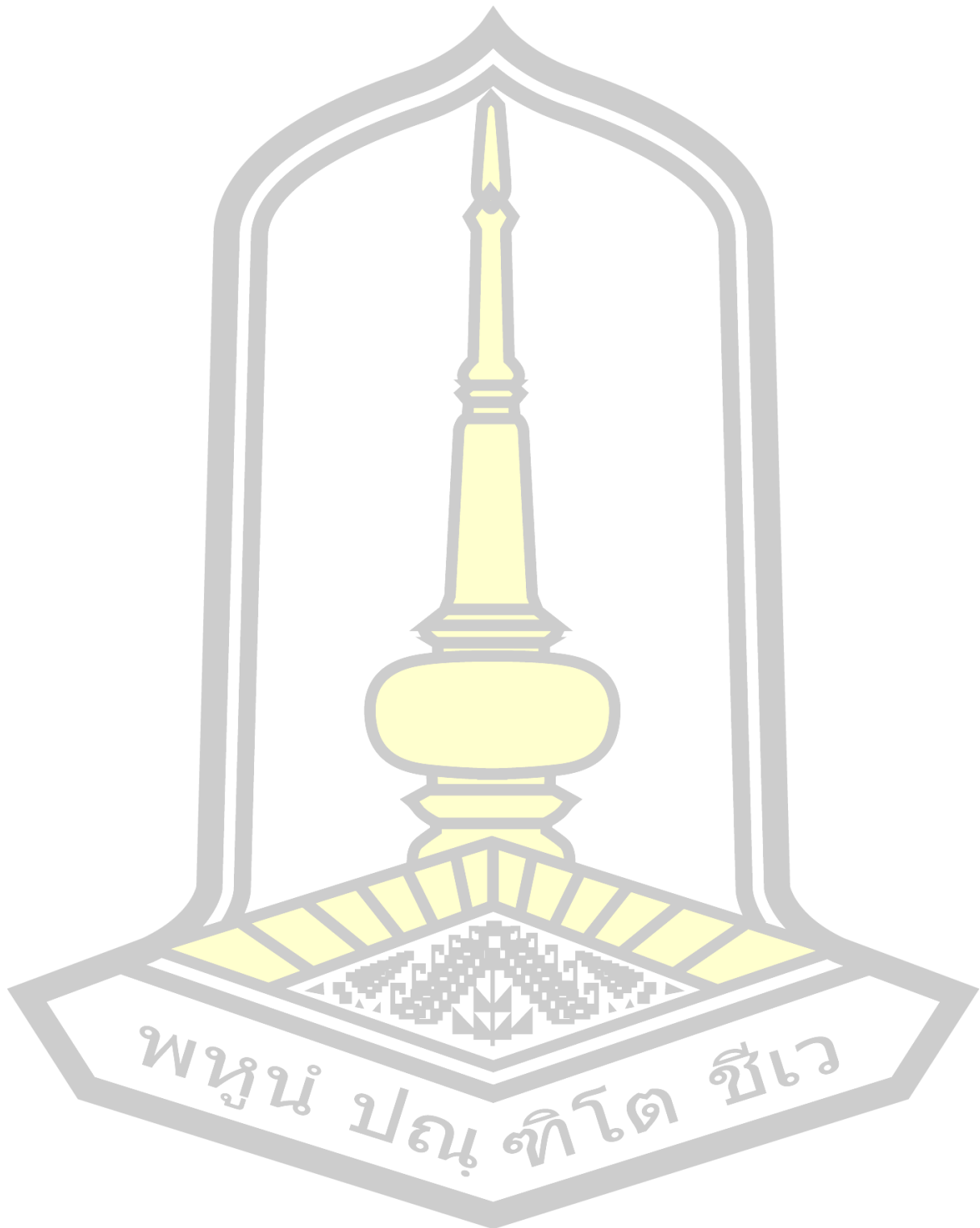
### 5.3 ข้อเสนอแนะ

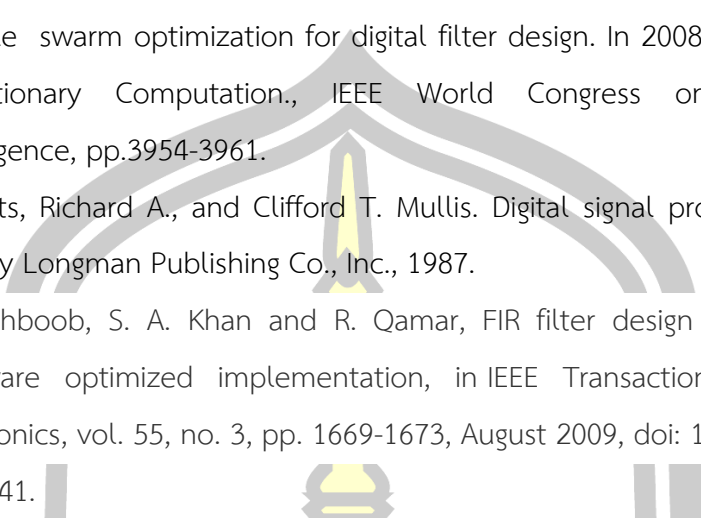
ในงานวิจัยการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านดิจิตอลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์ จำนวนจำกัดแบบเหมาะที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง สิ่งที่พบปัญหาคือ การเลือก Cutoff frequency และ Sampling frequency สำหรับการจำลอง ถ้ามีค่าไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดคลื่นความถี่เกิด ความไม่เสถียร และการกำหนดค่าพารามิเตอร์วิธีฝูงผึ้งให้เหมาะสม ถ้ากำหนดขอบเขตการค้นหาไม่เหมาะสมจะได้คำตอบที่ไม่ดี และขั้นตอนในการค้นหาคำตอบใหม่จะไม่มีประโยชน์





บรรณานุกรม

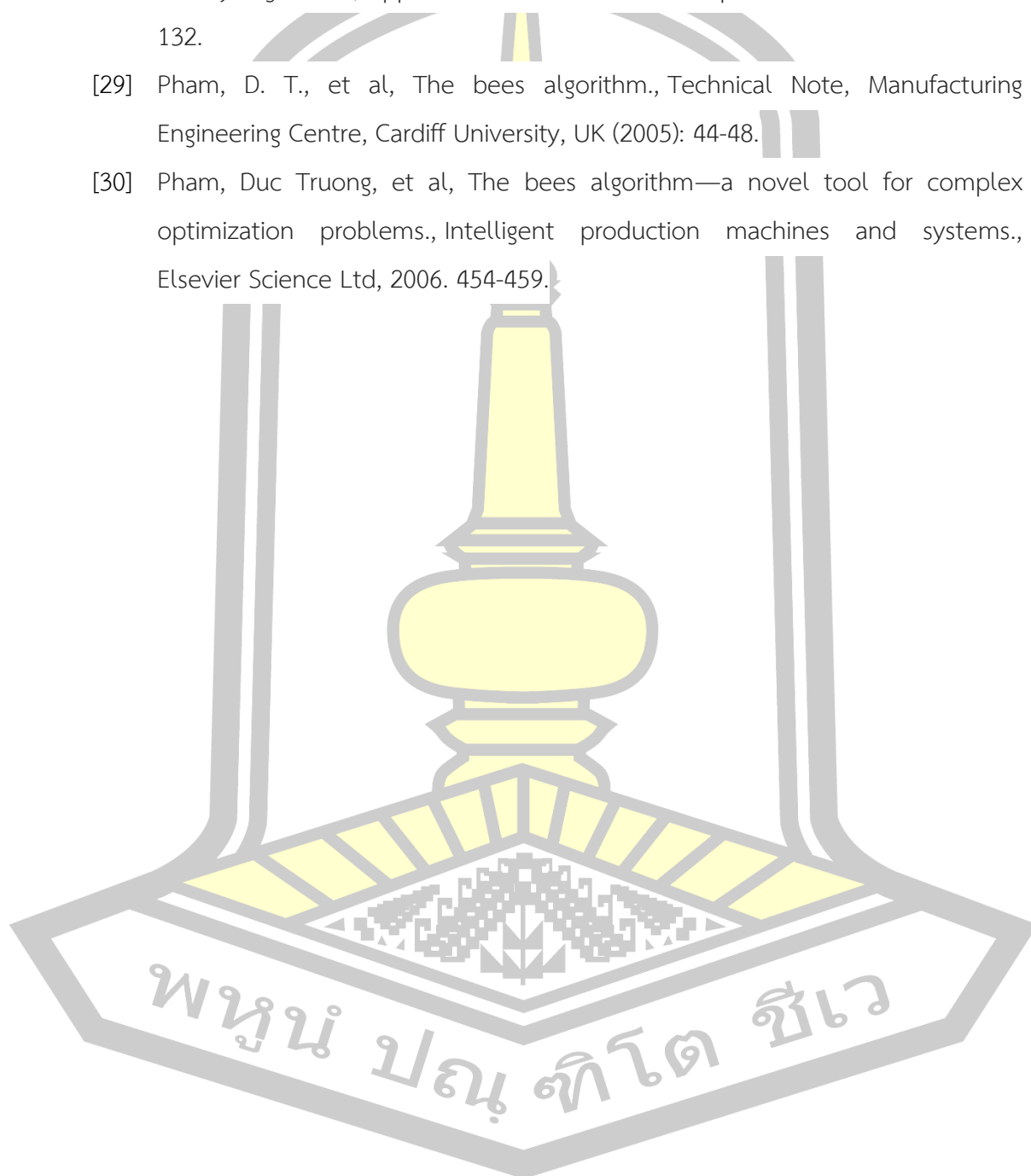


- 
- [1] Luitel, B., & Venayagamoorthy, G. K. (2008, June). Differential evolution particle swarm optimization for digital filter design. In 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation., IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp.3954-3961.
- [2] Roberts, Richard A., and Clifford T. Mullis. Digital signal processing. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1987.
- [3] R. Mehboob, S. A. Khan and R. Qamar, FIR filter design methodology for hardware optimized implementation, in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1669-1673, August 2009, doi: 10.1109/TCE.2009.5278041.
- [4] Yong Lim and S. Parker, FIR filter design over a discrete powers-of-two coefficient space, in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.31, no., pp.583-591, June 1983, doi: 10.1109/TASSP.1983.1164085.
- [5] M. B. Trimale and Chilveri, A review: FIR filter implementation, 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2017, pp. 137-141, doi: 10.1109/RTEICT.2017.8256573.
- [6] G. Jinding, H. Yubao and S. Long, Design and FPGA Implementation of Linear FIR Low-pass Filter Based on Kaiser Window Function, 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Shenzhen, China, 2011, pp. 496-498, doi: 10.1109/ICICTA.2011.408.
- [7] Arya, Rachna and Shiva Jaiswal, Design of Low pass FIR Filters using Kaiser Window Function with variable parameter Beta ( $\beta$ ). "International Journal of Multidisciplinary and Current Research 3 (2015): 220-224.
- [8] Mandal, Sangeeta, et al, Design of optimal linear phase FIR high pass filter using craziness-based particle swarm optimization technique. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences 24.1 (2012): 83-92.
- [9] Mandloi, Mantar Singh, and Gulab Rao Kumrey. "FIR high pass filter for improving performance characteristics of various windows." International Journal of Advanced Engineering Research and Science 4.1 (2017): 236998.

- [10] Shayesteh, Mahrokh G., and Mahdi Mottaghi-Kashtiban, FIR filter design using a new window function. 2009 16th International Conference on Digital Signal Processing. IEEE, 2009.
- [11] Yousif, Adel Jalal, Ghazwan Jabbar Ahmed and Ali Subhi Abboud, Design of Linear Phase High Pass FIR Filter using Weight Improved Particle Swarm Optimization." International Journal of Advanced Computer Science and Applications 9.9 (2018)
- [12] Mandal, Sangeeta, et al, Design of optimal linear phase fir high pass filter using improved particle swarm optimization. ACEEE International Journal on Signal and Image Processing 3 (2012): 5-9.
- [13] S. K. Saha, R. Kar, T. I. Mandai, N. Kumar and S. P. Ghoshal, Optimal linear phase fir high pass filter design using PSOCFIWA-WM, 2012 World Congress on Information and Communication Technologies, Trivandrum, India, 2012, pp. 768-773, doi: 10.1109/WICT.2012.6409178.
- [14] Kumari, Neelam, and Priyanka Jaglan. "Design of FIR Low Pass Filter using Particle Swarm Optimization Algorithm." International Journal of Advanced Research and Publications 1.3 (2017).
- [15] S. Mondal, D. Chakraborty, R. Kar, D. Mandal and S. P. Ghoshal, Novel particle swarm optimization for high pass FIR filter design, 2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012, pp. 413-418, doi:10.1109/SHUSER.2012.6268874.
- [16] Karaboga, Nurhan, and Bahadir Cetinkaya. "Design of digital FIR filters using differential evolution algorithm." Circuits, Systems and Signal Processing 25 (2006): 649-660.
- [17] G. Jinding, H. Yubao and S. Long, Design and FPGA Implementation of Linear FIR Low-pass Filter Based on Kaiser Window Function, 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Shenzhen, China, 2011, pp. 496-498, doi: 10.1109/ICICTA.2011.408.

- [18] A. A. Eleti and A. R. Zerek, FIR digital filter design by using windows method with MATLAB, 14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering - STA'2013, Sousse, Tunisia, 2013, pp. 282-287, doi: 10.1109/STA.2013.6783144.
- [19] G. Gautam, S. Shrestha, and S. Cho, Spectral Analysis of Rectangular, Hanning, Hamming and Kaiser Window for Digital Fir Filter, International journal of advanced smart convergence, vol. 4, no. 2, pp. 138–144, Nov. 2015.
- [20] Ahmed, Suhaib. "Design Analysis of High Pass FIR Filters Using Hanning, Bartlett and Kaiser Windows." International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering 2.11 (2012).
- [21] Hannah, Adjei AS, and George K. Agordzo, A Design of a low-pass FIR filter using Hamming Window Functions in Matlab, Comput. Eng, Intell. Syst 11.2 (2020): 24-30.
- [22] Chakraborty, Subhadeep, Advantages of Blackman window over hamming window method for designing FIR filter, International Journal of Computer Science & Engineering Technology 4.08 (2013).
- [23] A. G. V. Severino, L. L. S. Linhares and F. M. U. de Araújo, Optimal design of digital low pass Finite Impulse Response filter using Particle Swarm Optimization and Bat Algorithm, 2015 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Colmar, France, 2015, pp. 207-214.
- [24] Podder, Prajoy, et al, Comparative performance analysis of hamming, hanning and blackman window, International Journal of Computer Applications 96.18 (2014): 1-7.
- [25] Muralidhar, P. V., et al, Implementation of different FIR high pass filters using fractional Kaiser window, 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems. Vol. 2. IEEE, 2010.
- [26] Dorigo, Marco, Mauro Birattari, and Thomas Stutzle, Ant colony Optimization, IEEE computational intelligence magazine 1.4 (2006): 28-39.

- [27] Blum, Christian, Ant colony optimization: Introduction and recent trends, *Physics of Life reviews* 2.4 (2005): 353-373.
- [28] Karaboga, Dervis and Bahriye Akay, A comparative study of artificial bee colony algorithm., *Applied mathematics and computation* 214.1 (2009): 108-132.
- [29] Pham, D. T., et al, The bees algorithm., Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK (2005): 44-48.
- [30] Pham, Duc Truong, et al, The bees algorithm—a novel tool for complex optimization problems., *Intelligent production machines and systems.*, Elsevier Science Ltd, 2006. 454-459.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาว โยธกา ตั้งตระกูล  
วันเกิด วันที่ 19 เมษายน พ.ศ.2538  
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 150/65 ถนนศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000  
ตำแหน่งหน้าที่การงาน อาจารย์  
สถานที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น  
ประวัติการศึกษา  
พ.ศ. 2560 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (คอ.บ.)  
วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น  
พ.ศ. 2563 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)  
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
พ.ศ. 2567 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.)  
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ จิต ชีวะ