



รายงานการวิจัย

การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของวัสดุโดย  
ใช้คุณสมบัติความยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น  
(Computer Programming of Transfer Function of Linear  
Viscoelasticity Property)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รายงานการวิจัย

การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของวัสดุโดย  
ใช้คุณสมบัติความยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น  
(Computer Programming of Transfer Function of Linear  
Viscoelasticity Property)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

จิระพล ศรีเจริญผล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

Assoc.Prof. Dr. Nickolay P. Moskin

นายอัมฤชยุทธ รอดพ่าย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2548

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2551

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้  
คณาจารย์ในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และ ครอบครัวที่คอยให้  
คำแนะนำ และกำลังใจในการทำงานวิจัย

## บทคัดย่อ

การศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น เป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต(ความเค้น หรือ ความเครียด) ที่กระทำต่อวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น กับ เอาพุท (ความเครียด หรือ ความเค้น) ที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแบบจำลองที่ใช้กับวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น ได้แก่ แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) แบบจำลองเคลวิน-ไวท(Kelvin-Voigt model) และแบบจำลองเชิงเส้นพื้นฐาน(Standard Linear model) ซึ่งไม่สามารถอธิบายคุณสมบัติของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นได้ถูกต้อง อาทิเช่น แบบจำลองแมกซ์เวลล์จะไม่มีคุณสมบัติของการคืนรูป(Recovery) แบบจำลองเคลวิน-ไวทจะไม่มีคุณสมบัติการการพักความเค้น(Stress Relaxation) และแบบจำลองเชิงเส้นพื้นฐานจะใช้อธิบายได้ดีสำหรับของแข็งที่สามารถคืนตัวได้ 100 % เท่านั้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นที่แสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน(Transfer function) ที่สามารถอธิบายคุณสมบัติของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นได้ถูกต้อง ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถใช้หลักการทฤษฎีการควบคุมในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น โดยวิธีระบุเอกลักษณ์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดคือ พลังงานสะสม(Storage modulus)  $G'(\omega)$  พลังงานที่สูญเสีย(Loss modulus)  $G''(\omega)$  และความถี่  $(\omega)$  ที่กระทำต่อวัสดุ ไปประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด และ วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก ด้วยความถี่และค่าความแปรปรวนของชุดข้อมูล

คำสำคัญ: กลศาสตร์ของวัสดุ, ทฤษฎีการควบคุม, วิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ

## Abstract

The study and analysis of mathematical models of linear viscoelastic materials aims to investigate the relationship between input (stress or strain) on such materials and output (strain or stress) that occurs from the response of such materials. Generally, the mathematical models used for linear viscoelastic materials are the Maxwell model, the Kelvin-Voigt model and the standard linear model. These models cannot accurately describe the properties of linear viscoelastic materials. For instance, the Maxwell model does not show the recovery behavior of materials, the Kelvin-Voigt model does not demonstrate the stress relaxation and the standard linear model can be applied well only for solid materials that can be recovered 100%. This paper is aimed to identify the mathematical model of linear viscoelastic materials. The model can be expressed in terms of transfer function that can accurately describe the properties of linear viscoelastic materials. The control theory can be used to find out the mathematical model of linear viscoelastic materials using the system identification method for which the storage modulus  $G'(\omega)$ , loss modulus  $G''(\omega)$  and input frequency ( $\omega$ ) obtained from the measurement are used. To determine the transfer function coefficients, the least square method, the weighting least square method with input frequency and the weighting least square method with variance are used.

Keywords: Mechanics of Materials, Control Theory, System Identification

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	จ
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	
2.1 ลักษณะทางคณิตศาสตร์ .....	4
2.2 วิธีระเบียบเชิงตัวเลข .....	6
บทที่ 3 ผลการวิจัย	
3.1 การทดสอบ โปรแกรม โดยชุดข้อมูลที่มีค่าความแปรปรวน .....	9
3.2 การใช้โปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนกับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง....	16
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุป .....	22
4.2 ข้อเสนอแนะ .....	22
บรรณานุกรม .....	23
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลผลิตจากงานวิจัย .....	ก-1
ภาคผนวก ข ประวัติผู้วิจัย .....	ก-2
ภาคผนวก ค แผนผัง โปรแกรม (Program flowchart) .....	ก-13

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า $\lambda_i$ และ $G_{ai}$ .....	19
---	----

## สารบัญภาพ

รูปที่ 3.1 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega$ .....	10
รูปที่ 3.2 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega^2$ .....	10
รูปที่ 3.3 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\sigma^2$ .....	11
รูปที่ 3.4 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $\sigma^2$ .....	11
รูปที่ 3.5 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด.....	12
รูปที่ 3.6 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega$ .....	13
รูปที่ 3.7 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\sigma^2$ .....	13
รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega$ กับชุดข้อมูลที่มีการกระจายตัว.....	14
รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\sigma^2$ กับชุดข้อมูลที่มีการกระจายตัว.....	14
รูปที่ 3.10 ฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega$ กับชุดข้อมูลมีจำนวนค่าที่วัด 100 ความถี่.....	15



รูปที่ 3.11 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด.....	16
รูปที่ 3.12 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega$ .....	17
รูปที่ 3.13 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega^2$ .....	17
รูปที่ 3.14 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $\sigma^2$ .....	18
รูปที่ 3.15 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\sigma^2$ .....	18
รูปที่ 3.16 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega$ ของ polyethylene.....	20
รูปที่ 3.17 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\omega^2$ ของ polyethylene.....	20
รูปที่ 3.18 แสดงค่า $G'(\omega_i)$ และ $G''(\omega_i)$ กับฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก $1/\sigma^2$ ของ polyethylene.....	21
รูปที่ ก1 แผนผังโปรแกรมของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก.....	ก-13
รูปที่ ก2 แผนผังโปรแกรมของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก.....	ก-14

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุแล้ว วัสดุในอุดมคติที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ ของแข็งยืดหยุ่น (Elastic solid) และของเหลวหนืด (Viscous liquid) โดยซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติของแข็งยืดหยุ่น จะเป็นวัสดุที่เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกก็จะมี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอยู่ในสมดุคใหม่ แต่เมื่อแรงกระทำนั้นถูกกลดลงจนเป็นศูนย์ วัสดุก็จะกลับคืนสภาพกลับสู่รูปร่างหรือสมดุคดั้งเดิมทันที (ยกเว้นในกรณีที่ผ่านมาจุด Yield) โดยความสัมพันธ์จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) และวัสดุที่มีคุณสมบัติของเหลวหนืดจะเป็นวัสดุที่มีรูปร่างอย่างไม่สามารถคืนตัวกลับมาอยู่ในสภาพเดิมเมื่อไม่มีแรงกระทำแล้ว ซึ่งความสัมพันธ์จะเป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newton's Law) แต่วัสดุบางชนิด เช่น ไม้ พอลิเมอร์ หรือแม้แต่เลือดและกล้ามเนื้อของมนุษย์ ไม่สามารถจะจัดให้อยู่ในกลุ่มของแข็งยืดหยุ่น หรือของเหลวหนืดได้ เนื่องจากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ความถี่ อุณหภูมิ เวลา อัตราเร็วในการทดสอบ เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่มีสมบัติประเภทนี้จะถูกเรียกว่าวัสดุยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic materials) การตอบสนองของวัสดุยืดหยุ่นหนืด จะแสดงพฤติกรรมของทั้งของแข็งยืดหยุ่น และของเหลวหนืด ในการศึกษาเกี่ยวกับความยืดหยุ่นหนืดจะศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่ไม่เป็นสัดส่วนคงที่ขึ้นอยู่กับเวลาในการตอบสนองของวัสดุ โดยอาศัยแบบจำลองที่ใช้กระบอกของเหลวถูกสูบ (Dash pot) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของไหลที่เป็นของเหลวหนืด (Viscous liquid) และใช้สปริง (Spring) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของแข็งยืดหยุ่น (Elastic solid) โดยแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แบบจำลองแบบแมกเวลล์ (Maxwell model), แบบเคลวินหรือวอยจท์ (Kelvin or Voigt model) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กัน

ปัญหาที่พบในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นคือแบบจำลองที่ได้ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุได้ถูกต้อง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เพื่อสังเคราะห์หาฟังก์ชันการถ่ายโอนของวัสดุ โดยอาศัยคุณสมบัติความยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นของวัสดุเป็นการระบุเอกลักษณ์ของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นวิธีหนึ่งโดยใช้หลักการทางทฤษฎีควบคุมอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตที่กระทำต่อวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น ซึ่งการได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนจะทำให้เราได้ทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุทั้งทางด้านสถิตยศาสตร์ (static) และพลวัต (dynamic) เป็นวิธีการนำไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการวิจัยและพัฒนาต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ทำการเขียน โปรแกรมเพื่อหาฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยใช้คุณสมบัติความยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นของวัสดุ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการเขียน โปรแกรม เพื่อใช้ในการสังเคราะห์หาค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของวัสดุ โดยอาศัยคุณสมบัติความยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นของวัสดุ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ภาคการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ วัสดุศาสตร์ จากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของความยืดหยุ่นหนืด รวมทั้งการออกแบบเครื่องมือวัดความยืดหยุ่นหนืด

## บทที่ 2

### วิธีดำเนินการวิจัย

Levy [1] ได้นำเสนอเทคนิคในการสังเคราะห์หาฟังก์ชันการถ่ายโอนโดยใช้ข้อมูลการตอบสนองเชิงความถี่ Katkov *et al* [2] ได้สังเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้ข้อมูลค่าจริงและค่าจินตภาพของการตอบสนองเชิงความถี่ Whitfield [3] ได้นำเสนอวิธีระบุเอกลักษณ์ และเทคนิคเช่นเดียวกับ Levy โดยเพิ่มวิธีการถ่วงน้ำหนักซึ่งได้ผลที่ดีในช่วงความถี่ต่ำ Choe [4] ได้ทำการศึกษาวีธีสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอย่างง่าย จากข้อมูลขนาด และเฟส วิธีการกำลังสองน้อยสุด(Least square method) โดยพิจารณาแบบที่อยู่ในช่วงความถี่ต่ำ และการถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega$  Kim *et al* [5] ได้นำเสนอวิธีกำลังสองน้อยสุด, Recursive Least Squares (RLS) และ Total Least-Square (TLS) ในการระบุเอกลักษณ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนบนโดเมนความถี่ Luc Peirlinckx *et al* [6] ได้ศึกษาวิจัยหาเอกลักษณ์ของสมการคอนสติติวทีฟ (Constitutive equations) สำหรับวัสดุเชิงประกอบ(Composite materials) ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นชนิดเชิงเส้น Ping Yu *et al* [8] ได้ศึกษาวิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบพลวัตของการตอบสนองทางรีโอโลยีของวัสดุยืดหยุ่นชนิด ซึ่งวิธีการนี้ถูกพัฒนาเพื่อหาค่าฟังก์ชันการพักความเค้น และการก๊ิบของวัสดุ โดยพิจารณาในโดเมนของความถี่ ซึ่งเป็นการสมมติแบบจำลองในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา(Discrete-time system) Kwang Soo Cho *et al* [9] ได้ทำการศึกษาหาแบบจำลองที่ได้จากการสังเกตสำหรับวัสดุยืดหยุ่นชนิดเชิงเส้นของโพลีเมอร์แบบไม่กระจายตัว ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ทำนายปรากฏการณ์โดยการพิจารณาเฉพาะผลกระทบของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์และวัสดุยืดหยุ่นชนิดเชิงเส้นเท่านั้น ผลที่ได้คือแบบจำลองสามารถทำนายค่าพลังงานสะสม( $G'(\omega)$ ) และพลังงานที่สูญเสีย( $G''(\omega)$ )ได้ งานวิจัยที่ได้กล่าวมานั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ทำการศึกษาหาแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งมีตัวแปรสำคัญ ที่สามารถวัดได้เช่น ความถี่ในการตอบสนอง ค่าพลังงานสะสม ค่าพลังงานสูญเสียของวัสดุยืดหยุ่นชนิด เป็นต้น

วัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้ คือการนำข้อมูลที่วัดได้ พลังงานสะสม  $G'(\omega)$  พลังงานที่สูญเสีย  $G''(\omega)$  และความถี่  $(\omega)$  ของวัสดุสำหรับบทนี้เป็นการนำเสนอระเบียบวิธีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้คือการนำข้อมูลที่วัดได้ พลังงานสะสม  $G'(\omega)$  พลังงานที่สูญเสีย  $G''(\omega)$  และความถี่  $(\omega)$  ของวัสดุยืดหยุ่นชนิดเชิงเส้น มาสังเคราะห์หาฟังก์ชันการถ่ายโอน ของวัสดุ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับความยืดหยุ่นชนิดจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดที่ไม่เป็นสัดส่วนคงที่แต่จะขึ้นอยู่กับเวลาในการตอบสนองของวัสดุ โดยวิธีระเบียบเชิงตัวเลข และ ทฤษฎีควมคุม นี้มาใช้ร่วมกับวิธีกำลังสองน้อยสุด, วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วง

น้ำหนัก (Weighting least squares method) ในการสร้างสมการเชิงเส้นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นตัวแปรต้น และค่าที่ได้จากการทดลองในที่นี้คือ ค่าพลังงานสะสม ค่าพลังงานที่สูญเสีย และความถี่ เป็นตัวแปรตาม โดยใช้วิธีการ pseudo inverse ในการแก้ปัญหาสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน ใช้วิธีหาค่ารากของสมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) เพื่อหาค่าแห่งของโพลมาพิจารณาความเสถียรของวัสดุ และหาค่าความผิดพลาดจากนอร์มรากกำลังสอง (root-square norm:  $L_2$ -norm) ในการพิจารณาเปรียบเทียบความถูกต้องของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ โดยขั้นตอนในการคำนวณโดยโปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการทดสอบโปรแกรมโดยชุดข้อมูลที่มีค่าความแปรปรวนแล้วใช้โปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอน ทั้งแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก และถ่วงน้ำหนักด้วยค่า  $1/\omega$ ,  $1/\omega^2$ ,  $\sigma^2$  และ  $1/\sigma^2$  เพื่อหาสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันถ่ายโอน และส่วนที่สองเป็นการใช้โปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนกับชุดข้อมูลที่ี้จากการทดลอง

## 2.1 ลักษณะทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลวัตของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น สามารถวัดค่าพลังงานสะสม ค่าพลังงานที่สูญเสีย และค่า  $\tan \delta$  ซึ่ง เป็นวิธีการที่ใช้ในการทดสอบเชิงพลวัตของวัสดุยืดหยุ่นหนืดสามารถจำแนกได้เป็น 3 แบบคือการสั่นแบบอิสระแบบมีความหน่วง การสั่นแบบอิสระแบบมีการสั่นพ้อง และการสั่นเนื่องจากแรงแบบไม่มีการสั่นพ้อง วิธีการเหล่านี้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO6721 เพื่อใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งลักษณะคุณสมบัติของการตอบสนองเชิงพลวัตโดยวิธีการสั่นแบบเฉื่อย โดยให้ความเครียดกระทำกับวัสดุยืดหยุ่นหนืดมีค่าเท่ากับ  $\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t$  โดยค่า  $\gamma_0$  คือค่าขนาดของความเครียด และ  $\omega$  คือความถี่ที่ใช้กระตุ้นระบบ เราพบว่าความเค้นเฉื่อยที่ได้มีมุมเฟสที่แตกต่างจากค่าความเครียดเท่ากับค่าหนึ่ง โดยมุมเฟสมีค่าต่างกัน ดังนั้นสมการการตอบสนองของความเค้นได้ดังสมการ

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) = \gamma_0 |G^*(j\omega)| \sin(\omega t + \delta) \quad (1)$$

โดย  $\delta = \arctan \frac{G''}{G'}$  คือ มุมเฟสต่าง

$G^*(j\omega) = G'(\omega) + jG''(\omega)$  คือค่ามอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)

$$|G^*(j\omega)| = \sqrt{(G'(\omega))^2 + (G''(\omega))^2} \quad (2)$$

$$G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad \text{และ} \quad G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta$$

$G'(\omega)$  คือพลังงานสะสม และ  $G''(\omega)$  คือพลังงานที่สูญเสียเป็นความร้อนในระหว่างการเปลี่ยนรูปในการวิเคราะห์ระบบ เมื่อให้อินพุตกับระบบแล้ว สังเกตพฤติกรรมการตอบสนองของเอาพุตที่เกิดขึ้น และจากสมการ(1) สามารถเขียนในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนี้

$$\tau(j\omega) = \frac{\sum_{k=0}^n b_k (j\omega)^k}{\sum_{v=0}^m a_v (j\omega)^v} \gamma(j\omega) = G^*(j\omega)\gamma(j\omega) \quad (3)$$

โดย  $n \leq m$

ในการทดลองจะได้ค่า  $G'(\omega)$  และ  $G''(\omega)$  จากการเปลี่ยนแปลงความถี่ ( $\omega_i$ ) ในความถี่เฉือนที่มีต่อวัสดุ ดังนั้นสมการ (3) สามารถเขียนอยู่ในรูปของมอดูลัสเชิงซ้อนได้

$$\begin{aligned} G^*(j\omega_i) &= G'(\omega_i) + jG''(\omega_i) = \frac{B(j\omega_i)}{A(j\omega_i)} \\ &= \frac{b_n (j\omega_i)^n + b_{n-1} (j\omega_i)^{n-1} + \dots + b_1 (j\omega_i) + b_0}{a_m (j\omega_i)^m + a_{m-1} (j\omega_i)^{m-1} + \dots + a_1 (j\omega_i) + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่  $a_0 = 1$

จากสมการ (4) เขียนใหม่ได้

$$B(j\omega_i) = A(j\omega_i)\{G'(\omega_i) + jG''(\omega_i)\} \quad (5)$$

สมการ (5) สามารถจัดรูปให้อยู่ในค่า  $G'(\omega)$  และ  $G''(\omega)$  ได้

$$\begin{aligned} \sum_{h=0}^p b_{2h} (-1)\omega_i^{2h} - G'(\omega_i) \sum_{u=0}^r a_{2u} (-1)^u \omega_i^{2u} + G''(\omega_i) \sum_{v=0}^s a_{2v+1} (-1)^v \omega_i^{2v+1} &= G'(\omega_i) \\ \sum_{l=0}^p b_{2l} (-1)\omega_i^{2l} - G''(\omega_i) \sum_{u=0}^r a_{2u} (-1)^u \omega_i^{2u} - G'(\omega_i) \sum_{v=0}^s a_{2v+1} (-1)^v \omega_i^{2v+1} &= G''(\omega_i) \end{aligned}$$

โดยกำหนดให้  $p = \lfloor n/2 \rfloor, q = \lfloor (n-1)/2 \rfloor, r = \lfloor m/2 \rfloor, s = \lfloor (m-1)/2 \rfloor$

เราสามารถนำสมการข้างต้น มาเขียนอยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} \Omega_1 & 0 & \Omega_2 & \Omega_3 \\ 0 & \Omega_4 & \Omega_5 & \Omega_6 \end{bmatrix} \{b_{even} \quad b_{odd} \quad a_{even} \quad a_{odd}\}^T = \begin{Bmatrix} G' \\ G'' \end{Bmatrix} \quad (6)$$

โดย  $b_{even} = b_2, b_4, \dots, b_{2p}, b_{odd} = b_1, b_3, \dots, b_{2q+1},$

$a_{even} = a_0, a_2, \dots, a_r$  และ  $a_{odd} = a_1, a_3, \dots, a_{2s+1}$

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\omega_1^2 & \omega_1^4 & \dots & (-1)^p \omega_1^{2p} \\ 1 & -\omega_2^2 & \omega_2^4 & \dots & (-1)^p \omega_2^{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & -\omega_N^2 & \omega_N^4 & \dots & (-1)^p \omega_N^{2p} \end{bmatrix}$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 G'_1 & -\omega_1^4 G'_1 & \omega_1^6 G'_1 & \dots & (-1)^{r+1} \omega_1^{2r} G'_1 \\ \omega_2^2 G'_2 & -\omega_2^4 G'_2 & \omega_2^6 G'_2 & \dots & (-1)^{r+1} \omega_2^{2r} G'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_N^2 G'_N & -\omega_N^4 G'_N & \omega_N^6 G'_N & \dots & (-1)^{r+1} \omega_N^{2r} G'_N \end{bmatrix}$$

$$\Omega_3 = \begin{bmatrix} \omega_1 G''_1 & -\omega_1^3 G''_1 & \omega_1^6 G''_1 & \dots & (-1)^s \omega_1^{2s+1} G''_1 \\ \omega_2 G''_2 & -\omega_2^3 G''_2 & \omega_2^6 G''_2 & \dots & (-1)^s \omega_2^{2s+1} G''_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_N G''_N & -\omega_N^3 G''_N & \omega_N^6 G''_N & \dots & (-1)^s \omega_N^{2s+1} G''_N \end{bmatrix}$$

$$\Omega_4 = \begin{bmatrix} \omega_1 & -\omega_1^3 & \omega_1^5 & \dots & (-1)^q \omega_1^{2q+1} \\ \omega_2 & -\omega_2^3 & \omega_2^5 & \dots & (-1)^q \omega_2^{2q+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_N & -\omega_N^3 & \omega_N^5 & \dots & (-1)^q \omega_N^{2q+1} \end{bmatrix}$$

$$\Omega_5 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 G''_1 & -\omega_1^4 G''_1 & \omega_1^6 G''_1 & \dots & (-1)^{r+1} \omega_1^{2r} G''_1 \\ \omega_2^2 G''_2 & -\omega_2^4 G''_2 & \omega_2^6 G''_2 & \dots & (-1)^{r+1} \omega_2^{2r} G''_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_N^2 G''_N & -\omega_N^4 G''_N & \omega_N^6 G''_N & \dots & (-1)^{r+1} \omega_N^{2r} G''_N \end{bmatrix}$$

$$\Omega_6 = \begin{bmatrix} \omega_1 G'_1 & -\omega_1^3 G'_1 & \omega_1^6 G'_1 & \dots & (-1)^s \omega_1^{2s+1} G'_1 \\ \omega_2 G'_2 & -\omega_2^3 G'_2 & \omega_2^6 G'_2 & \dots & (-1)^s \omega_2^{2s+1} G'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_N G'_N & -\omega_N^3 G'_N & \omega_N^6 G'_N & \dots & (-1)^s \omega_N^{2s+1} G'_N \end{bmatrix}$$

โดย  $N$  คือจำนวนชุดข้อมูล

## 2.2 วิธีระเบียบเชิงตัวเลข

ในการสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอน โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด จากสมการ (6) เขียนได้ใหม่ ดังนี้

$$\Omega X = G \quad (7)$$

โดยที่  $\Omega$  คือเมทริกซ์สัมประสิทธิ์,  $X$  คือเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ และ  $G$  คือเวกเตอร์ที่ได้จากการวัด

ในการประยุกต์ใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก และเขียนสมการ (7) ใหม่ ได้ดังนี้

$$w\Omega X = wG \quad (8)$$

$$\text{โดย } w = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_N \end{bmatrix}_{k \times k} \quad (9)$$

โดยค่า  $w$  คือเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก ที่เป็นเมตริกซ์ทแยงมุม และ  $k = 2$  เท่าของจำนวนชุดข้อมูล ( $2 \times N$ ) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ ใช้ค่าในการถ่วงน้ำหนัก 4 แบบคือ

$$\text{แบบที่ 1 กำหนดให้ } w_k = \frac{1}{\omega_k} \quad (10)$$

$$\text{แบบที่ 2 กำหนดให้ } w_k = \frac{1}{\omega_k^2} \quad (11)$$

$$\text{โดย } \omega_k = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_N \ \omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_N]_{1 \times k}$$

สำหรับ การถ่วงน้ำหนักแบบที่ 3 และ แบบที่ 4 จะใช้ค่า ความแปรปรวน (Variance ( $\sigma^2$ )) ของชุดข้อมูล ซึ่งเป็นค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูลนั้นๆ นั่นคือ

$$\text{แบบที่ 3 กำหนดให้ } w_k = \sigma_k^2 \quad (12)$$

$$\text{แบบที่ 4 กำหนดให้ } w_k = \frac{1}{\sigma_k^2} \quad (13)$$

$$\text{โดย } \sigma_k^2 = [\sigma_{1,G}^2 \ \sigma_{2,G}^2 \ \dots \ \sigma_{N,G}^2 \ \sigma_{1,G}^2 \ \sigma_{2,G}^2 \ \dots \ \sigma_{N,G}^2]_{1 \times k}$$

โดยทั่วไป การหาเมตริกซ์ผกผัน  $\Omega^{-1}$  ของเมตริกซ์ใดๆ นั้น เมตริกซ์  $\Omega$  นั้น ต้องเป็นเมตริกซ์จัตุรัส และต้องมีลักษณะเป็น full rank คือที่ทุกคอลัมน์ หรือแถวภายในเมตริก  $\Omega$  ต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน (Linearly independent) แต่ในการหาเมตริกซ์ผกผันเทียม(Pseudo-inverse) นั้น เป็นวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการหาเมตริกซ์ผกผัน ซึ่งใช้ในการหาเมตริกซ์  $\Omega$  ที่เป็นเมตริกซ์จัตุรัส หรือเมตริกที่มีจำนวนแถวมากกว่าจำนวนคอลัมน์ แต่มีเงื่อนไขว่าเมตริกซ์นั้นต้องเป็นเมตริกที่มี



ลักษณะเป็น full rank เพื่อให้ผลเฉลยที่ได้ unique นั่นเอง ข้อดีอีกประการของวิธีการนี้ก็คือ เป็นวิธีการที่สามารถหาเมตริกซ์ผกผันได้ ไม่ว่าเมตริก  $\Omega$  จะเป็น singular matrix หรือ non-singular matrix คือ เมตริกซ์ที่ค่า  $\det(\Omega) = 0$  หรือ  $\det(\Omega) \neq 0$  ตามลำดับ ซึ่งจะได้

$$X = (\Omega^T \Omega)^{-1} \Omega^T G \quad (14)$$

สำหรับเมตริกซ์ที่มีการถ่วงน้ำหนักด้วยเมตริกซ์  $w$

$$X = (\Omega^T w w^T \Omega)^{-1} \Omega^T w^T w G \quad (15)$$

ขั้นตอนต่อมาคือการวิเคราะห์หาความเสถียรของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ โดยพิจารณาตำแหน่งโพลของระบบ โดยหาค่ารากสมการเฉพาะของระบบ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จะต้องมีความเสถียรเพราะพิจารณาวัสดุยืดหยุ่นหนืดที่มีความเสถียร วิธีการหาผลเฉลยที่ให้ค่าที่มีความถูกต้องนั้น ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าผลเฉลยกับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ หาค่าความผิดพลาด ( $\varepsilon$ ) มาร่วมพิจารณาในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ดีที่สุด

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^N \left| G^*(j\omega_i) - \frac{B(j\omega_i)}{A(j\omega_i)} \right|^2 \quad (16)$$

โดย  $\varepsilon$  คือค่าความผิดพลาด

แต่ค่าความผิดพลาดนั้นสามารถกำหนดได้หลายรูปแบบ เนื่องจากค่าความผิดพลาดของระบบสมการอยู่ในรูปเวกเตอร์  $\varepsilon = [\varepsilon_i]$  ดังนั้นการหาขนาดของค่าความผิดพลาดเพื่อใช้ในการพิจารณา คือค่าความผิดพลาดของระบบสมการนอร์มแรกกำลังสอง

$$\|\varepsilon\|_2 = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_N^2} \quad (17)$$

แผนผังโปรแกรม(Program flowchart)ของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก และแบบถ่วงน้ำหนักได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค

## บทที่ 3

### ผลการวิจัย

ผลการวิจัยประกอบไปด้วย ผลการทดสอบและจำลองสถานการณ์ ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณโดยโปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนนั้น แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการทดสอบโปรแกรมโดยชุดข้อมูลที่มีค่าความแปรปรวน ด้วยโปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก และถ่วงน้ำหนักด้วยค่า  $1/\omega$ ,  $1/\omega^2$ ,  $\sigma^2$  และ  $1/\sigma^2$  และส่วนที่สองเป็นการใช้โปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนกับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

#### 3.1 การทดสอบโปรแกรมโดยชุดข้อมูลที่มีค่าความแปรปรวน

ในการประเมินและวิเคราะห์โปรแกรมที่ได้จากวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักนั้น ต้องมีการทดสอบความถูกต้อง ความแม่นยำ และความเสถียรของโปรแกรมนั้นๆ ก่อน สำหรับหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบ โปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนบางส่วน โดยการนำโปรแกรมไปประยุกต์เข้ากับปัญหาที่ทราบฟังก์ชันถ่ายโอน จากนั้นนำผลที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นๆ ซึ่งได้มีการทดสอบฟังก์ชันถ่ายโอนตั้งแต่  $n=1$  ถึง 5 และ  $m=1$  ถึง 5 โดยชุดข้อมูลมีจำนวนค่าที่วัด 50 ความถี่ ในช่วงความถี่  $10^{-1}$  ถึง  $10^1$  Hz และมีความแปรปรวนของชุดข้อมูล  $\pm 10\%$

**ผลตัวอย่างการทดสอบโปรแกรมที่ 1** โดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G^*(j\omega) = \frac{b_3(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0}{a_5(j\omega)^5 + a_4(j\omega)^4 + a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + 1} \quad (18)$$

โดย  $a_2 = 1.3542, a_3 = 0.4583, a_4 = 0.0729, a_5 = 4.167 \times 10^{-3}, a_1 = 1.879$

$b_3 = 1, b_2 = -10, b_1 = 31, b_0 = -30$

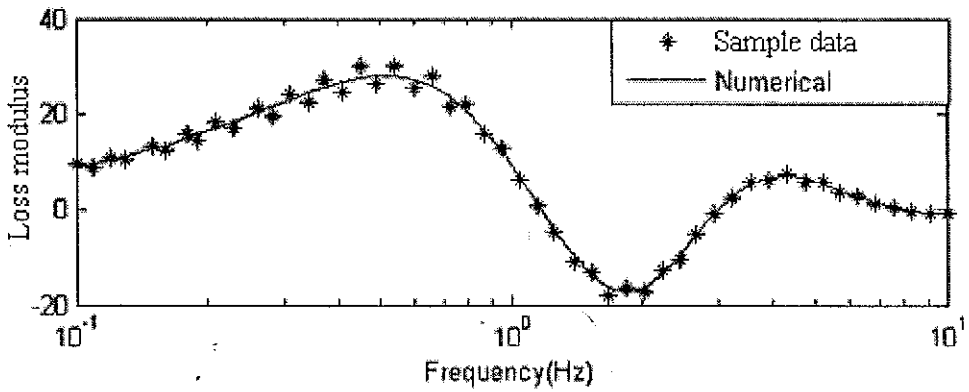
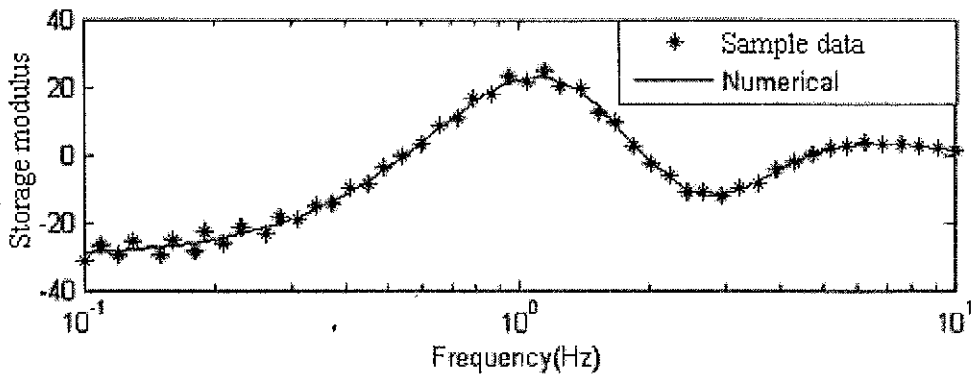
จากรูปที่ 3.1 ถึง 3.5 แสดงผลของการประเมินสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทดสอบ (18) ซึ่งผลเฉลยของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ไม่มีความเสถียรจะไม่นำมาพิจารณา และค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดที่ได้คือวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega$ ,  $\|\varepsilon\|_2 = 12.0444$  และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากผลของวิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบคือ

$$G^*(j\omega) = \frac{b_4(j\omega)^4 + b_3(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0}{a_5(j\omega)^5 + a_4(j\omega)^4 + a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + 1}$$

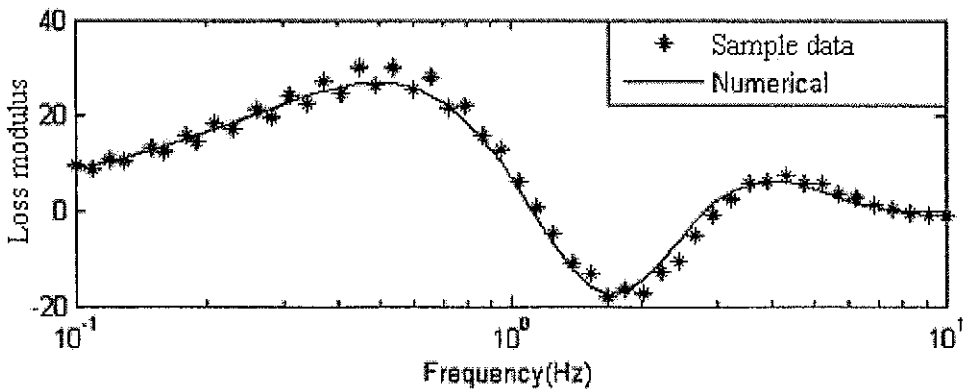
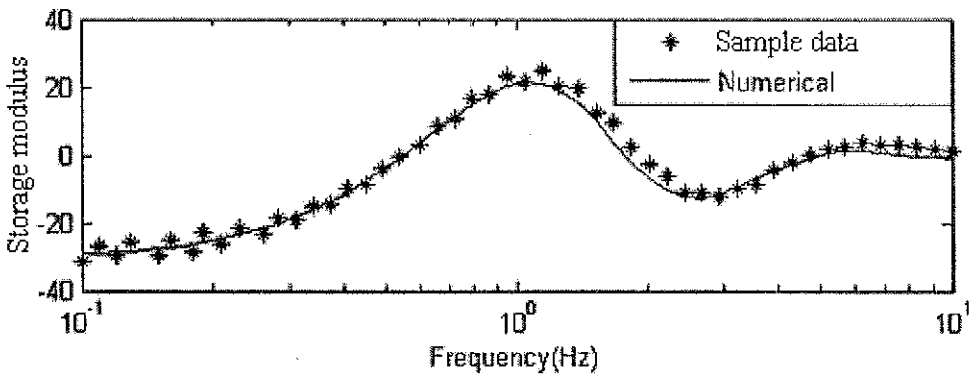
โดย  $a_5 = 4.078 \times 10^{-3}, a_4 = 0.07172, a_3 = 0.456, a_2 = 1.351, a_1 = 1.906$

$b_4 = 6.912 \times 10^{-3}, b_3 = 0.9968, b_2 = -10.22, b_1 = 30.16, b_0 = -30.37,$

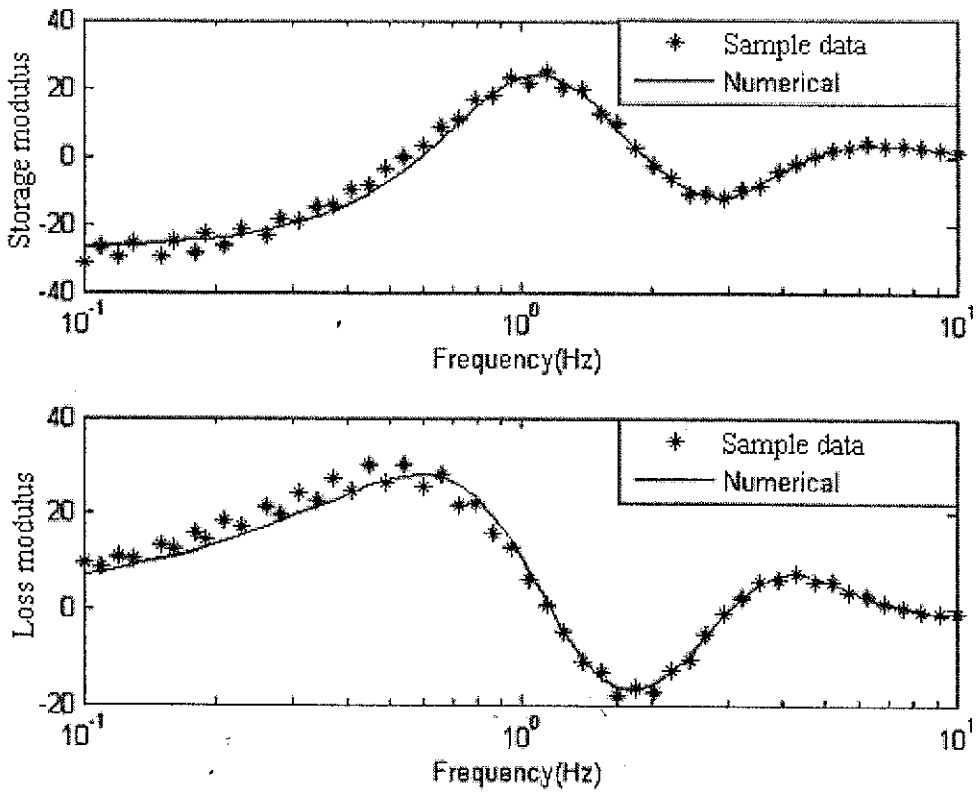
ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\sigma^2$  และ  $1/\omega^2$  คือ  $\|\varepsilon\|_2 = 20.127$  และ  $\|\varepsilon\|_2 = 20.4$



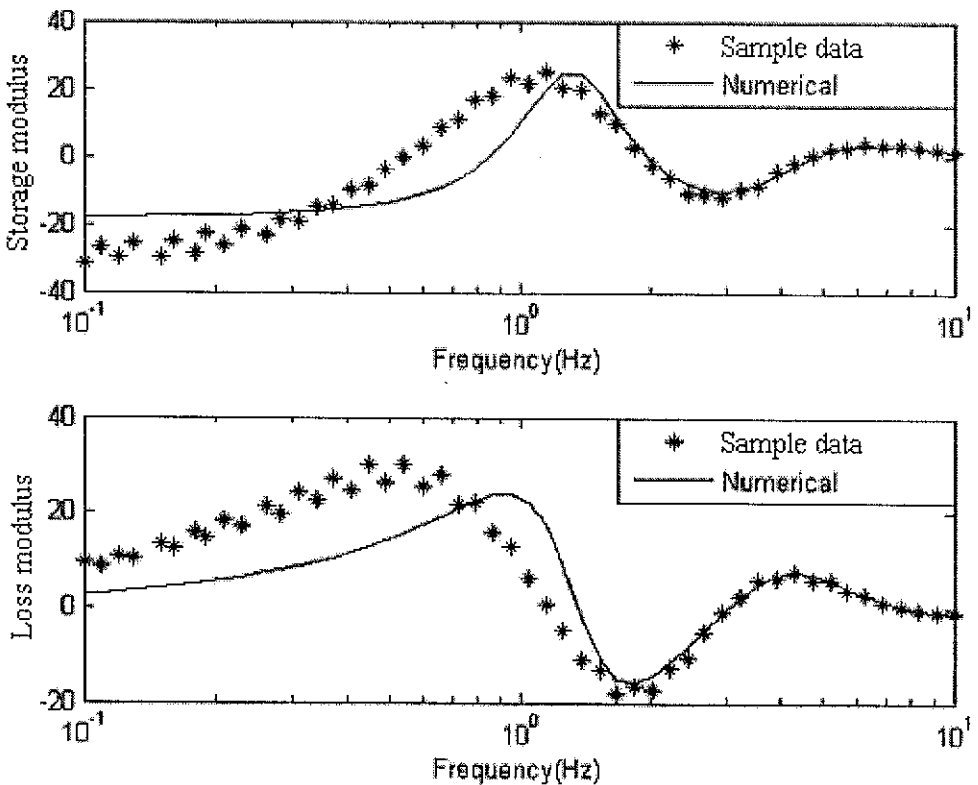
รูปที่ 3.1 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธี  
กำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\omega$



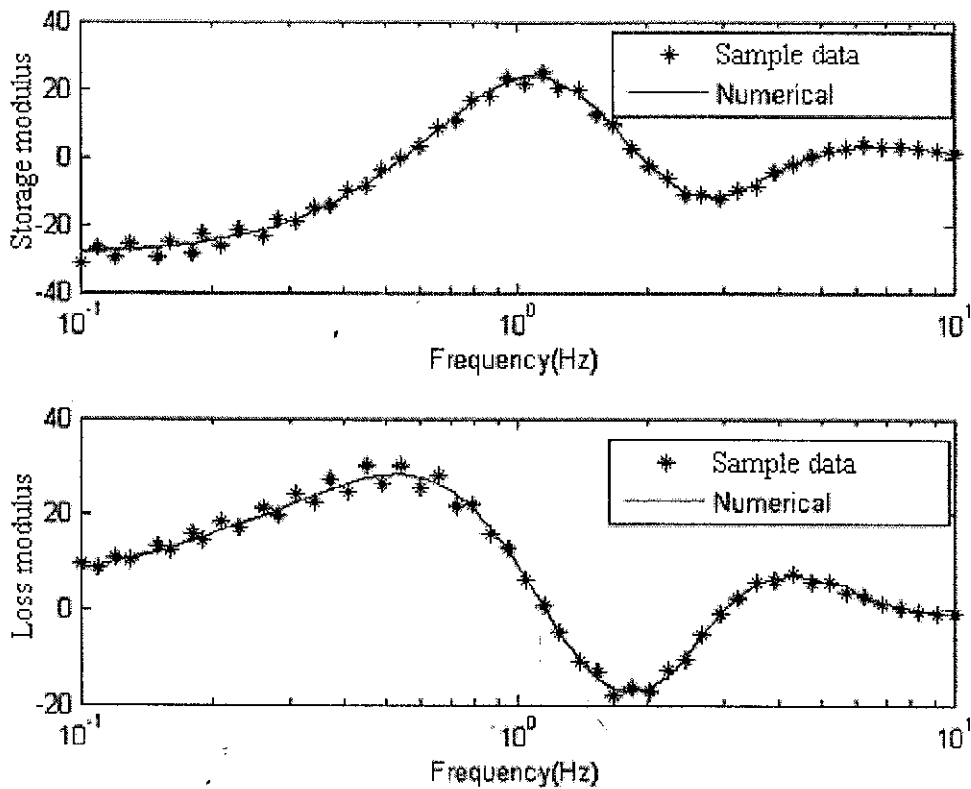
รูปที่ 3.2 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธี  
กำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\omega^2$



รูปที่ 3.3 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\sigma^2$



รูปที่ 3.4 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $\sigma^2$



รูปที่ 3.5 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด

ผลตัวอย่างการทดสอบโปรแกรมที่ 2. โดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

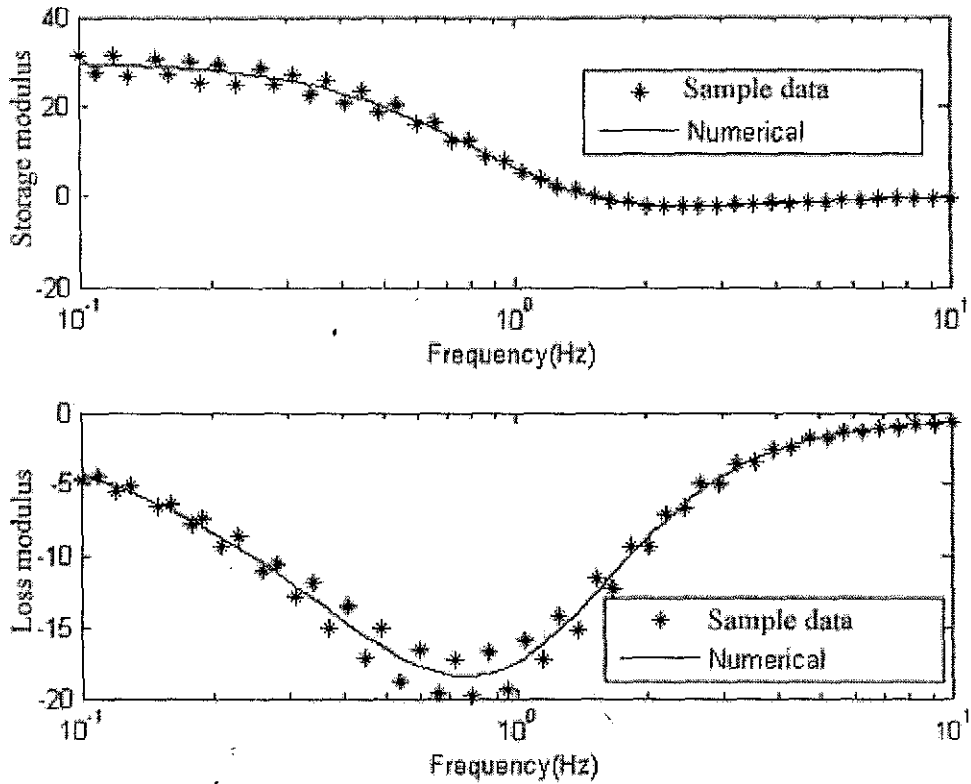
$$G^*(j\omega) = \frac{b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0}{a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + 1} \quad (19)$$

โดย  $b_2 = 1, b_1 = 11, b_0 = 30, a_3 = 0.1667, a_2 = 1, a_1 = 1.833$

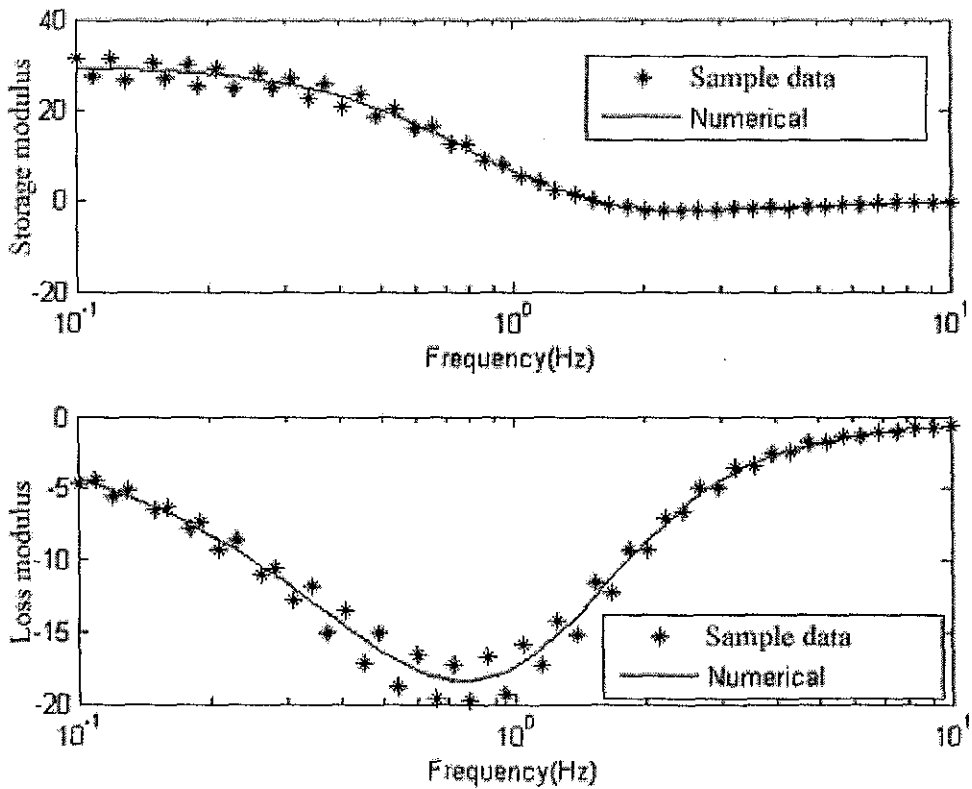
จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงผลของการประเมินสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทดสอบ (19) ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดที่ได้คือวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega$ ,  $\|\varepsilon\|_2 = 10.64$  และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากผลของวิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบคือ

$$G^*(j\omega) = \frac{0.1334(j\omega)^2 + 3.662(j\omega) + 29.94}{1.537 \times 10^{-2}(j\omega)^3 + 0.6207(j\omega)^2 + 1.579(j\omega) + 1}$$

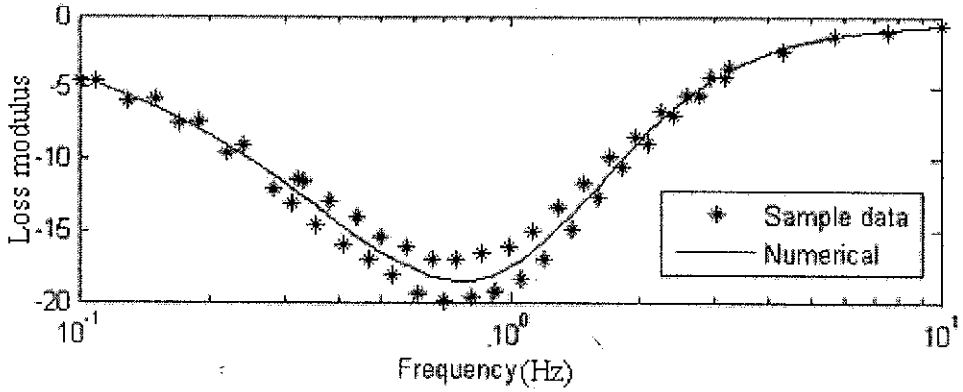
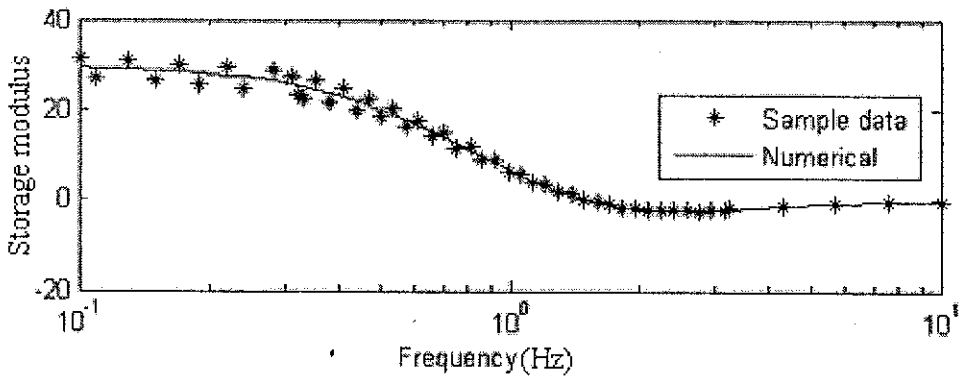
ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\sigma^2$  และ  $1/\omega^2$  คือ  $\|\varepsilon\|_2 = 10.646$  และ  $\|\varepsilon\|_2 = 10.75$



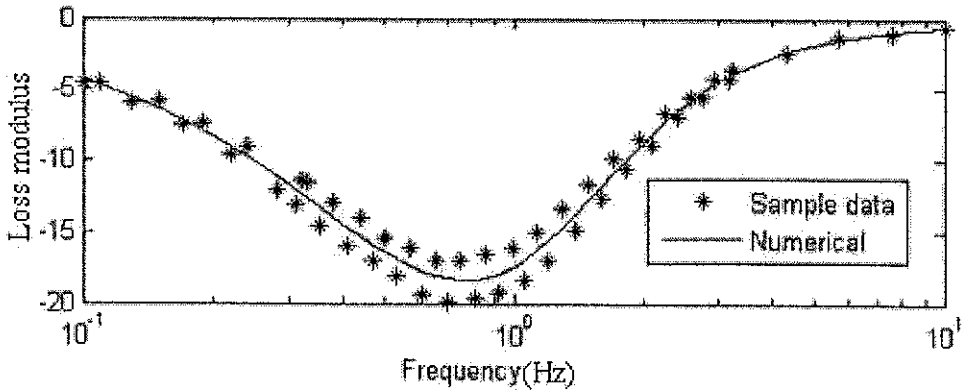
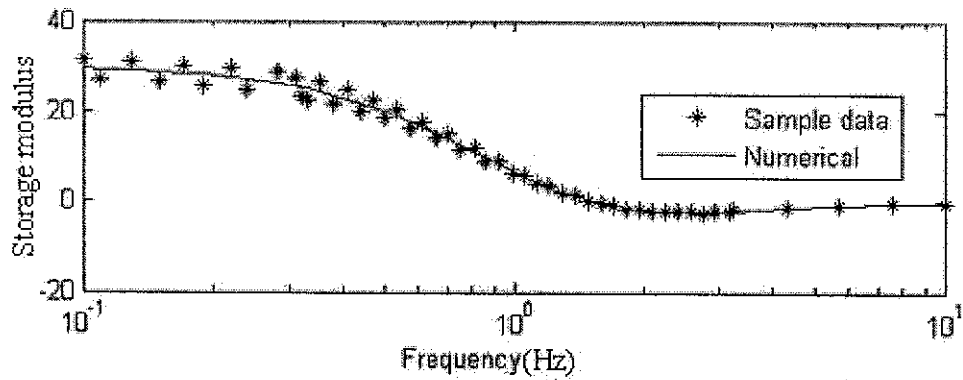
รูปที่ 3.6 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\omega$



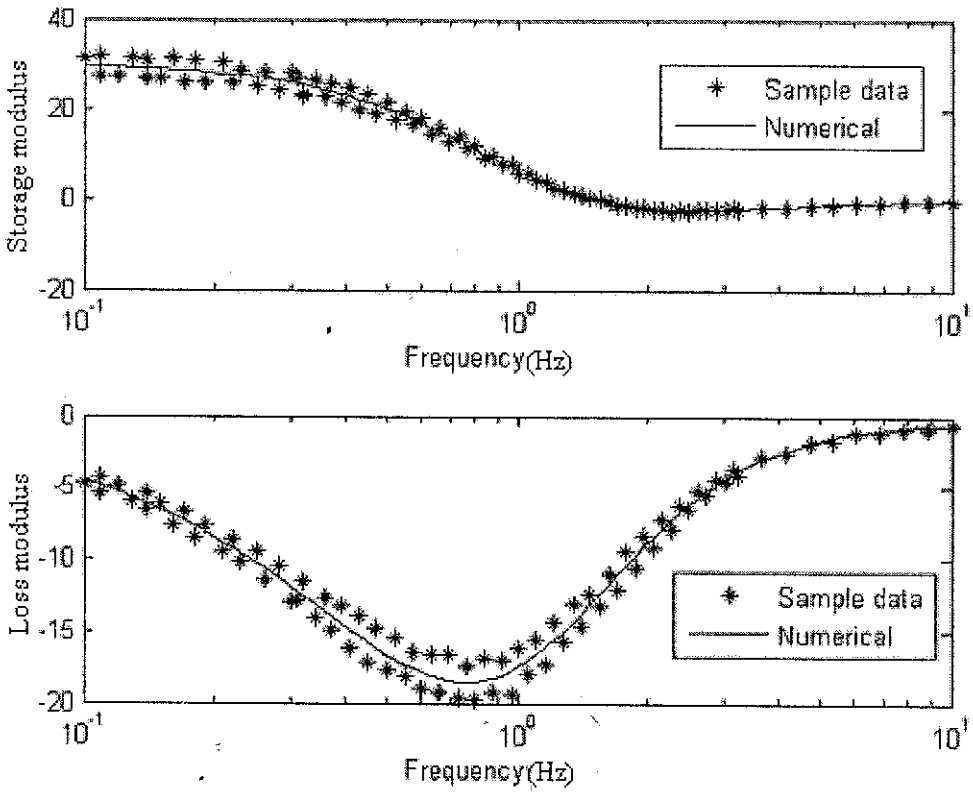
รูปที่ 3.7 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\sigma^2$



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\omega$  กับชุดข้อมูลที่มีการกระจายตัว



รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $(1/\sigma^2)$  กับชุดข้อมูลที่มีการกระจายตัว



รูปที่ 3.10. ฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\omega$  กับชุดข้อมูลมีจำนวนค่าที่วัด 100 ความถี่

ส่วนรูปที่ 3.8 และ 3.9 แสดงผลของการประเมินสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนกับชุดข้อมูลที่มีการกระจายตัว ซึ่งวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega$ ,  $\|\varepsilon\|_2 = 11.696$  และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ คือ

$$G^*(j\omega) = \frac{7.067 \times 10^{-2}(j\omega)^2 + 2.922(j\omega) + 29.94}{0.5879(j\omega)^2 + 1.549(j\omega) + 1}$$

และค่าความผิดพลาดโดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\sigma^2$  และ  $1/\omega^2$  คือ  $\|\varepsilon\|_2 = 11.678$  และ  $\|\varepsilon\|_2 = 11.392$  และรูปที่ 3.10 แสดงผลการสังเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนเมื่อชุดข้อมูลจำนวนการวัดเพิ่มขึ้นเป็น 100 ความถี่ในช่วงความถี่เดิม จากวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega$ ,  $\|\varepsilon\|_2 = 14.265$  และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้

$$G^*(j\omega) = \frac{0.1619(j\omega)^2 + 3.606(j\omega) + 30.23}{1.532 \times 10^{-2}(j\omega)^3 + 0.6139(j\omega)^2 + 1.582(j\omega) + 1}$$

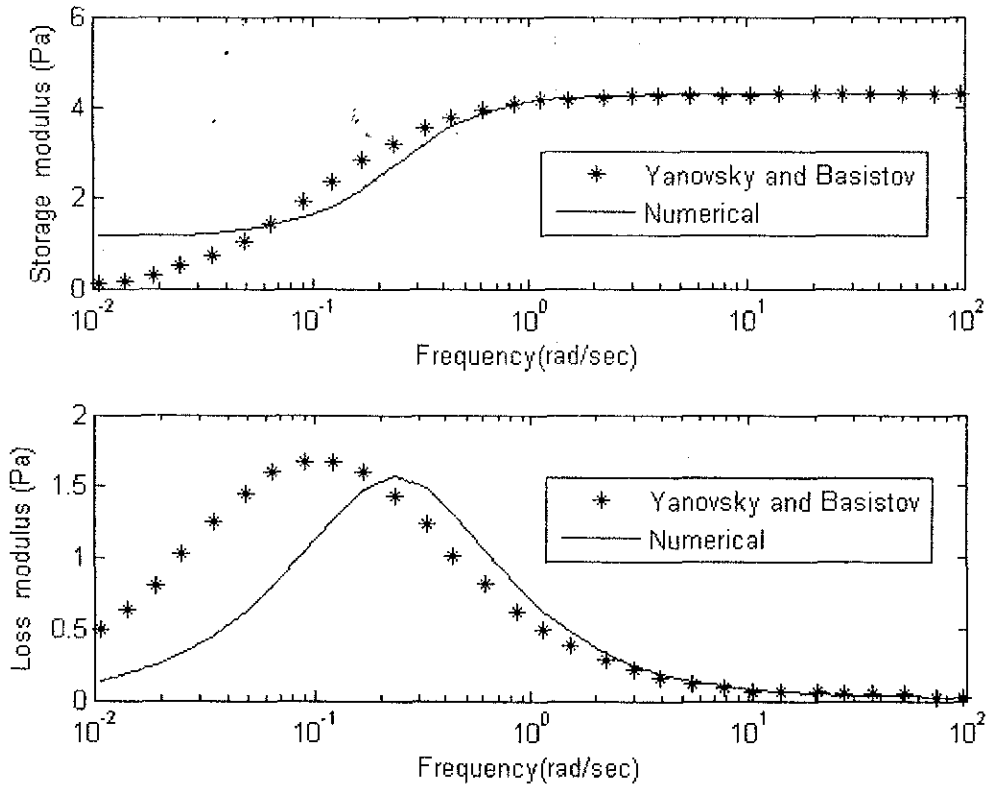
และค่าความผิดพลาดในกรณีนี้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\sigma^2$  และ  $1/\omega^2$  คือ  $\|\varepsilon\|_2 = 14.268$  และ  $\|\varepsilon\|_2 = 14.414$  ผลของค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นนั้น เพราะจำนวนข้อมูลที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง



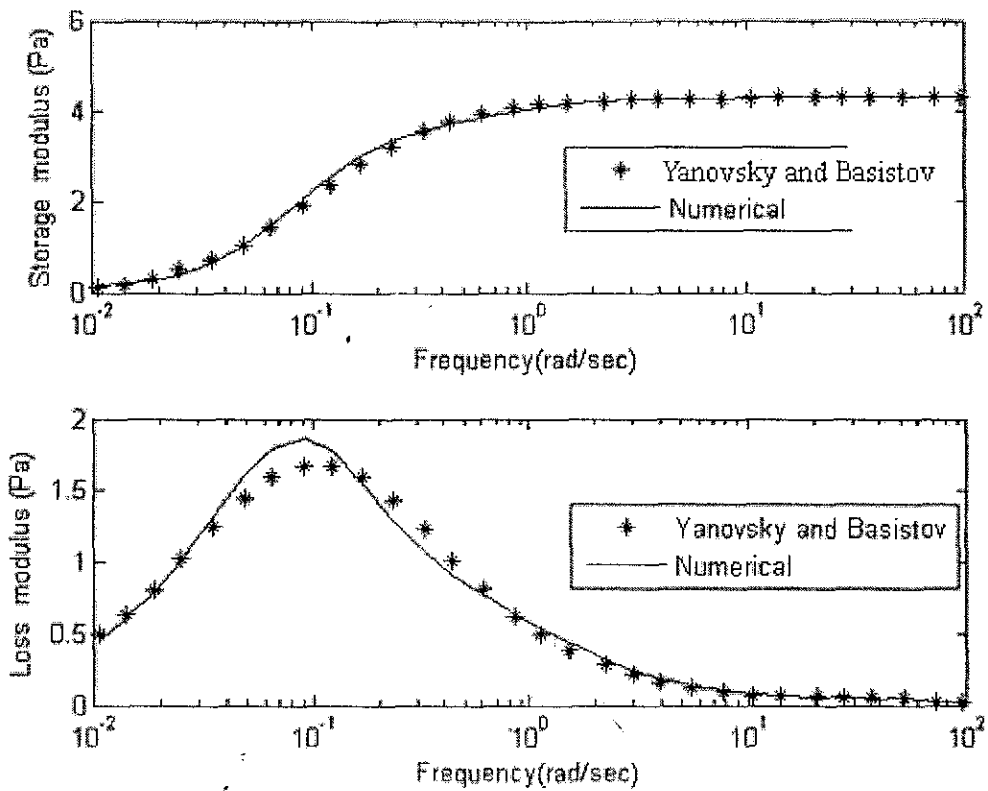
จากผลการทดสอบและจำลองสถานการณ์ในกรณีต่างๆที่พิจารณานั้น โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega$ ,  $1/\omega^2$  และ  $1/\sigma^2$  ในการสังเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นมีประสิทธิภาพดีพอเพียง

### 3.2 การใช้โปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนกับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

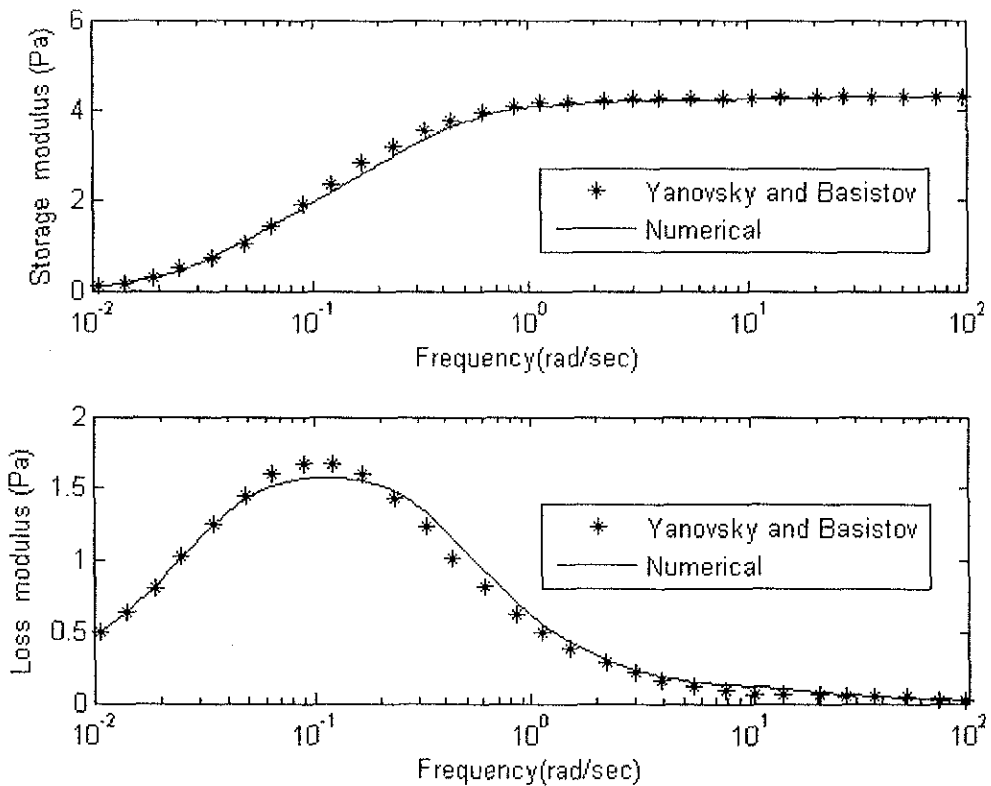
ตอนที่ 1. โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นเพื่อสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอน เมื่อผ่านกระบวนการทดสอบกับปัญหามาตรฐาน พบว่า มีความแม่นยำ และมีเสถียรภาพ จึงได้นำโปรแกรมดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับปัญหายืดหยุ่นหนืด โดยการนำผลการทดลองที่ได้ มาทำการใช้ร่วมกับ โปรแกรมสังเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอน โดยใช้ชุดข้อมูลจากการทดลองที่มีจำนวนค่าที่วัด 30 ความถี่ ในช่วงความถี่ 0.01-100 rad/sec ของ polybutadiene polymer ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $8.3 \times 10^{-4}$  kg (Yanovsky G. Yu., Basistov G. Yu. and Siginer A. Dennis. [7])



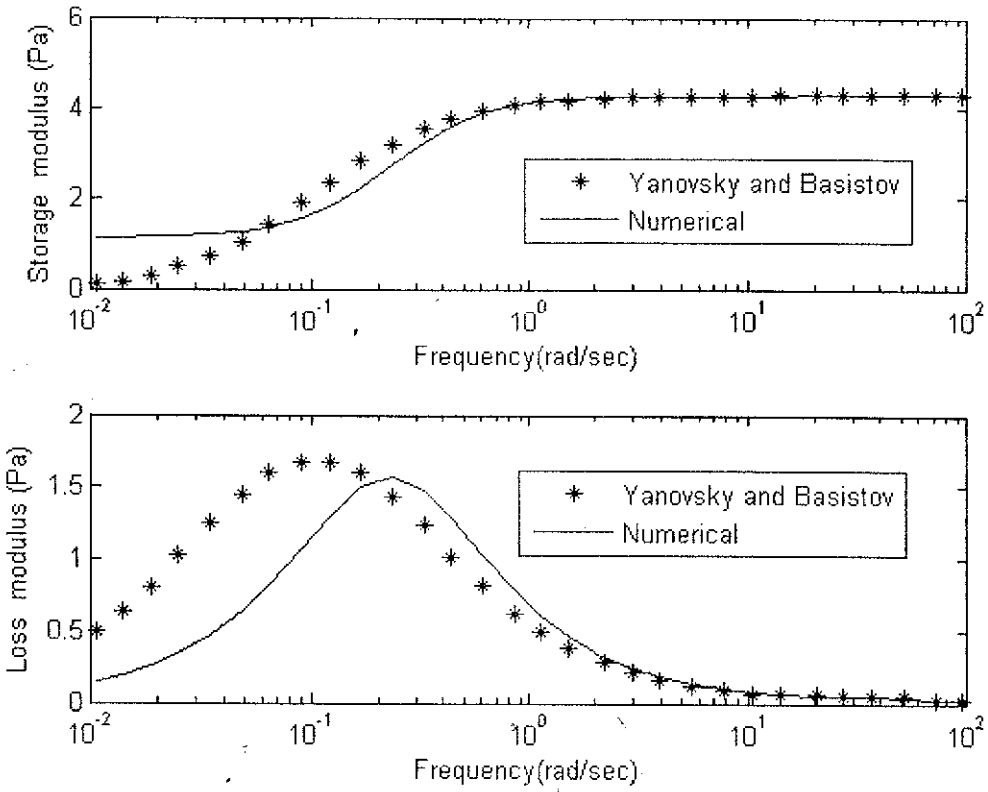
รูปที่ 3.11 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด



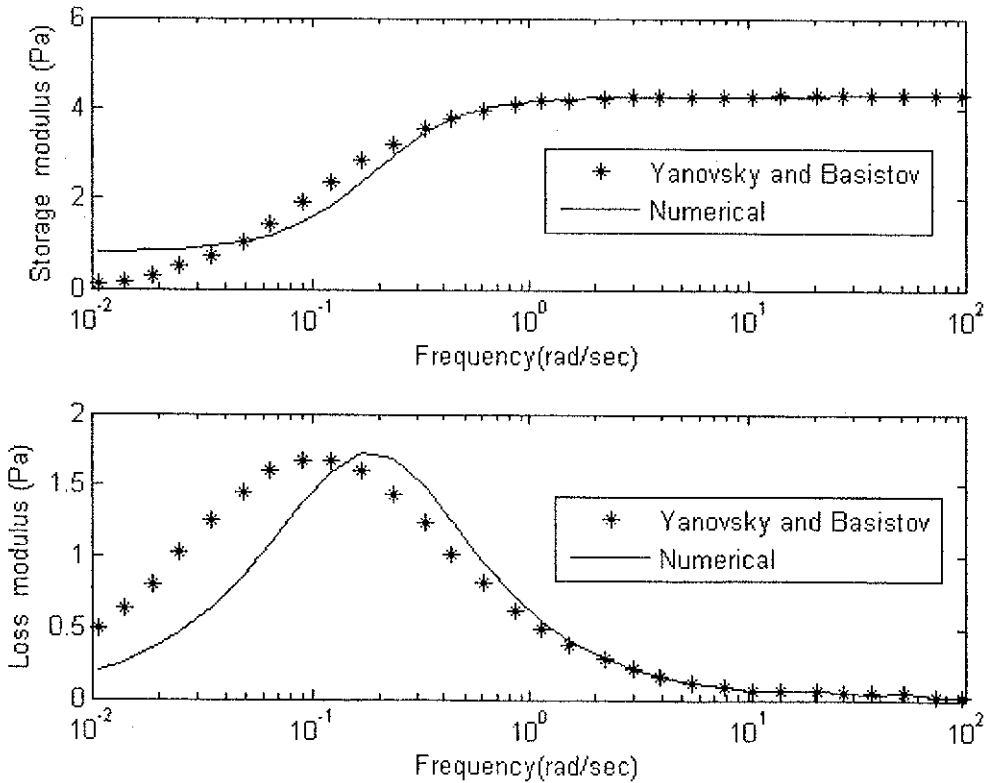
รูปที่ 3.12 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก ( $1/\omega$ )



รูปที่ 3.13 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\omega^2$



รูปที่ 3.14 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $\sigma^2$



รูปที่ 3.15 แสดงค่า  $G'(\omega_i)$  และ  $G''(\omega_i)$  กับความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $1/\sigma^2$

จากรูปที่ 3.11 ถึง 3.15 แสดงผลของการสังเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดที่ได้คือวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega^2$  และ  $\|e\|_2 = 0.588$  และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้

$$G^*(j\omega) = \frac{22.76(j\omega)^3 + 322.5(j\omega)^2 + 49.02(j\omega) + 0.01968}{5.277(j\omega)^3 + 77.47(j\omega)^2 + 23.25(j\omega) + 1}$$

ส่วนค่าความผิดพลาดน้อยที่เกิดขึ้นในลำดับถัดมา คือวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนักด้วย  $1/\omega$  และ  $1/\sigma^2$  คือ  $\|e\|_2 = 0.592$  และ  $\|e\|_2 = 2.076$

**ตอนที่ 2.** การประยุกต์โปรแกรมใช้กับ Linear low density polyethylene โดยใช้ metallocene เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการทดลองนี้เป็นการศึกษาที่สถานะของเหลวในช่วงที่เกิดการหลอมละลาย โดยใช้ข้อมูลจากบทความวิจัยของ Esra Kucukpinar *et al* (1999) [10] ที่พิจารณาในช่วง 0.01 – 1000 rad/sec โดยใช้แบบจำลอง Wagner ซึ่งพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถหาค่าพลังงานสะสม ค่าพลังงานที่สูญเสียได้ถูกต้อง เป็นไปดังสมการที่ (19) และสมการที่ (20)

$$G'(\omega) = \sum_i \frac{G_{oi} \lambda_i^2 \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (19)$$

$$G''(\omega) = \sum_i \frac{G_{oi} \lambda_i \omega}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (20)$$

โดย  $\lambda_i$  – relaxation time และ  $G_{oi}$  – relaxation strength

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า  $\lambda_i$  และ  $G_{oi}$  ของ Metallocene-catalyzed linear low density polyethylene resin ชนิด 350D60 ที่มีค่า  $M_w$  เท่ากับ 100,000 g/mol, Melt index เท่ากับ 1 g/10 min, Density เท่ากับ 0.917 g/cm<sup>3</sup>, Melting point เท่ากับ 119 °C

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า  $\lambda_i$  และ  $G_{oi}$

	Exceed 350D60
$\lambda_i, \text{sec}$	$G_{oi}, \text{Pa}$
10	1.94E+01
1	8.33E+02
0.1	3.93E+04
0.01	3.48E+05
0.001	3.70E+05
0.0001	1.00E+06

ภาคผนวก ก  
ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีผลผลิตซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

1. ปริญญวิศวกรรมศาสตร์มหำบัณฑิต จำนวน 1 เล่ม

- นายอัยฎายุธ รอดพำย. 2549. การสังเคราะห์หำฟังก์ชันถ่ายโอนของวัสดุยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

2.1 ประชุมวิชาการระดับชาติ

- Autsadáyut Rodpai, Jiraphon Srisertpol, N. P. Moshkin (2004) “Numerical Algorithm for Tránsfer Function Synthesize Using Experimental Frequency Response Data” , Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual National Symposium on Computational Science and Engineering., pp 269-272.
- Autsadayut Rodpai, Jiraphon Srisertpol (2006) “Mathematical Model of Linear Viscoelastic Materials using System Identification Method”, Proceedings of the 20<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference, 18-20 October 2006, Nakhon Ratchasima, Thailand.

2.2 ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- J. Srisertpol, A. Rodpai (2007) “Mathematical Model of Linear Viscoelastic Materials using Weighting Least Square Method”, Proceedings of the 26<sup>th</sup> IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2007), 12-14 February 2007, Innsbruck, Austria., pp.452-457

## ประวัติและผลงานทางวิชาการ

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล

(ภาษาอังกฤษ) Assistant Professor Jiraphon Srisertpol, Ph.D

## การศึกษา/คุณวุฒิ

2003 Ph.D. (System analysis, Control and Processing information) St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia. (ทุนสหพันธรัฐรัสเซีย)

1998 M.E. (Technical Maintenance Aviation Electrosystems and Pilot- Navigation Complexes) St.Petersburg State Academy of Aerospace Instrumentation, Russia.

## ตำแหน่งปัจจุบัน

1. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ผู้ดูแลหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ผลงานวิชาการ

- **Srisertpol, J., Katkov, M.S., Azamov A.A.**(2001), "The Synthesis of The Indirect Adaptive Control System", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium "Nonlinear Control Systems", pp 346-379.
- **Srisertpol, J.**(2001), "Adaptive System with Modal Control", Proceedings of the BICAMP'01-The Third international school-seminar, pp 64-66.
- **Srisertpol, J., Katkov, M.S., Azamov, A.A.,** (2002), "System Identification of Model Non-Stationary Plant Using The Structure of The Generalized Tuning of Measurement (GTSM)", Control and Information Systems for Mobile Objects "Seminars ASK Lab 2001" St.Petersburg, Polytechnic 2002. pp 163-171. (in russian)
- **Srisertpol, J., Katkov, M.S.**(2002), "Research of Adaptive Parametrical Measurement System For Non-Stationary Plant", Proceedings of the International Symposium "Space Instrument and Technologies" ,pp 101-102.
- **Srisertpol, J.,** "Method of Parameter Identification for Non-Stationary Process", The Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA) EuroXChange No. 7(Spring) 2002, pp 33-36.

- Autsadayut Rodpai, **Jiraphon Srisertpol**, N. P. Moshkin (2004) "Numerical Algorithm for Transfer Function Synthesize Using Experimental Frequency Response Data", Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual National Symposium on Computational Science and Engineering., pp 269-272.
- Chermtong Prattanaruk, **Jiraphon Srisertpol** (2004), "Synthesis Algorithm of Adaptive Dynamic Vibration Absorber to Suppress Beam Vibration", Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual National Symposium on Computational Science and Engineering., pp 389-392.
- รองศาสตราจารย์.ร.อ.ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และดร.จิระพล ศรีเสวีรัฐผล (2548) " เอกสารคำสอน รายวิชา 402401 ระบบควบคุมอัตโนมัติ", มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 265 หน้า
- Chermtong Prattanaruk, **Jiraphon Srisertpol** (2006) "Stiffness Adjustment of Dual Mass Cantilever Absorber for Suppressing Beam Vibration", Proceedings of the 20<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference, pp.621-628
- Autsadayut Rodpai, **Jiraphon Srisertpol** (2006) "Mathematical Model of Linear Viscoelastic Materials using System Identification Method", Proceedings of the 20<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference, pp.753-760
- Eakarong Sukjit, Jakkrapong Klawkla, **Jiraphon Srisertpol** and Ekachai Juntasaro (2006), "Using FLUENT to Predict Heat Transfer in a Computer Case to Optimize the Number of Fans and the Locations to install", Proceedings of the 20<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference, pp.607-612
- **J. Srisertpol**, A. Rodpai (2007) "Mathematical Model of Linear Viscoelastic Materials using Weighting Least Square Method", Proceedings of the 26<sup>th</sup> IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2007), 12-14 February 2007, Innsbruck, Austria., pp.452-457

งานสอน :

ระดับปริญญาตรี : Thermodynamic I, Internal Combustion Engine, Engineering Graphic I, Engineering Graphic II, Mechanical Vibration, Automatic Control Systems, Control of Mechanical Systems, Automated Manufacturing I, Mechanical Engineering Lab I, Mechanical Engineering Lab II, Mechanical Engineering Lab III, Manufacturing Engineering Lab I, Manufacturing Engineering Lab II, Manufacturing Engineering Lab III, Automotive Automatic Control Systems, Measurements and Instrumentation

ระดับปริญญาโท : System Dynamics, Advanced Control Systems, Advanced Mechanical Vibration, Advanced Numerical Methods for Mechanical Engineering, Experimental System Design, Vibration Analysis, Advanced Numerical Methods, Applied Mathematics, Classical and Modern Control Systems.

## ประวัติและผลงานทางวิชาการ

## Associate Professor Dr. Nikolay Moshkin

(Name) ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นาย นิโคไลย์ มอชกิน

(ภาษาอังกฤษ) Mr. Nikolay Moshkin

## (Degrees)

10/1984 Ph.D. (Candidate of Sciences). Mechanics of Fluids, Gas and Plasma, by Institute of Theoretical and Applied Mechanics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (SBRAS).

Supervisor: Prof. B. G. Kuznetsov. Subject: "Numerical simulation of pressure driving flow of viscose incompressible fluid flow".

10/1974 M.Sc. Applied Mathematics, Department of Mathematics and Mechanics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia. (Minor in numerical method in continuum mechanics).

## การศึกษา (Education)

1975-1978 Graduate study in The Department of Mathematics and Mechanics of Novosibirsk State University (Chair of Numerical Method in Continuum Mechanics (now days: chair of Mathematical Modelling))

1969-1974 Undergraduate study in The Department of Mathematics and Mechanics of Novosibirsk State University. Major in applied mathematics. Minor in numerical method in continuum mechanics.

## ตำแหน่งปัจจุบัน (Position)

ตำแหน่งทางวิชาการ : รองศาสตราจารย์

ตำแหน่งบริหาร : -

09/1980 - 05/1989 Assist. Prof., Specialized Scientific Study Center for Physics, Mathematics Chemistry and Biology Education of Novosibirsk State University Novosibirsk, Russia

01/1989 - 12/1996 Assoc. Prof., Specialized Scientific Study Center for Physics, Mathematics Chemistry and Biology Education of Novosibirsk State University Novosibirsk, Russia



1987 -1996	Assoc. Prof., Chair of Numerical Methods in Continuum Mechanics (from 1994 - Chair of Mathematical Modeling), Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
1993-1996	Vice-Dean. Department of Mathematics and Mechanics of Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
01/1996 - present:	Assoc. Prof.. School of Mathematics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

### ประสบการณ์การทำงาน (Employment)

1974 – 1975	Research Fellow, Department of Mathematics and Mechanics, Novosibirsk State University, Russia, Chair of Numerical Methods in Continuum Mechanics (From 1994 - Chair of Mathematical Modeling)
09/1978 - 05/1991	Senior researcher, Assistant researcher. Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Siberian Division, Novosibirsk, Russia.
01/1991 - 12/1996	Senior researcher. Institute of Computational Technologies, Russian Academy of Sciences, Siberian Division, Novosibirsk, Russia .
01/1996 – present	Associate Professor. School of Mathematics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

### ผลงานวิชาการ / ผลงานวิจัย (Publications)

#### Refereed Journal Publications and Refereed Conference Papers (selected)

- [J33] Moshkin N.P., Chernykh G.G., Voropaeva O.F., Internal Waves Generated by Turbulent Wakes Behind Towed and Self-Propelled Bodies in Linearly Stratified Medium, . Mathematical Modeling, **12**, No 10 (2000), 77-94. (in Russian)

2. [J34] Moshkin N.P., Mounnunprang P., An Numerical Algorithm for the Steady Euler Equations for Flowing-Through Problem, The Forth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 2000), Mrch 27-29, 2000, Karsetsart University , Bangkok, Thailand, pp.56-64.
3. [J35] Moshkin N.P., Mounnunprang p., A Numerical Method for Solving the Incompressible Euler Equations for Flowing-Through Problem. First National Symposium on GRAD-RESEARCH, Chiang Mai University, June 10-11, 2000, pp. 260-266.
4. [J36] Moshkin N.P., Mounnunprang P., Numerical Simulation of Ideal Incompressible Fluid Flows Through Bounded Domain when Tangent Components of Vorticity are Given on the Inflow Parts of the Domain Boundary. The Fifth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 2001), June 19-20, 2001, National Electronics and Computer Technology Center, Bangkok Conventional Center (BCC), Central Plaza, Thailand, pp.141-149.
5. [J37] Moshkin N.P., NUMERICAL STUDY OF NATURAL CONVECTION IN A RECTANGULAR ENCLOSURE FILLED WITH TWO IMMISCIBLE FLUIDS. Proceeding of a Symposiun Organazed by International Center for Heat and Mass Transfer, CHT'01: Advance in computational heat transfer II, Edotors, Graham de Vahl Davis and Eddie Leonardi., May 2001, Palm Cove, Queensland, Australiya, Begell House Inc., New York, Wallingford, 2001, pp.859-866 (ISBN: 1-56700-158-0).
6. [J38] Moshkin N.P., Chernykh G.G., Voropayeva O.F., Numerical Modeling of Internal Waves Generated by Turbulent Wakes Behind Self-propelled and Towed Bodies in Startified Media. In: N. Satofuka (Ed.): Computational Fluid Dynamics 2000, Proceedings of the First International Conference on Computational Fluid Dynamics, ICCFD, Kyoto, Japan,10-14 July 2000; ISBN 3540414592), Springer Verlag, Berlin (2001) 455-461.
7. [J39] Moshkin N.P., Numerical model to study natural convection in a rectangular enclosure filled with two immiscible fluids. International journal of heat and Fluid flow, **23**, No 3 (2002), 373-379.
8. [J40] Moshkin N.P., Numerical study of thermal convection in two immiscible fluid layers. Proceedings of BAILL 2002. An International Conference on Boundary and Interior Layers, Computational & Asymptotic Methods, The University of Western Australia, Perth, WA, 8th - 12th July, 2002, p.p. 189-194.
9. [J41] Moshkin N.P., Mounnamprang P., Numerical simulation of vertical ideal fluid flow through curved channel. *41*, 2003, pp. 1173-1189. International Journal for Numrical Methods in Fluids (Int. J. Numer. Meth. Fluids) , **41**, No (2003), 1173-1189.

10. [J42] Chernykh G.G., Moshkin N.P., and Voropayeva O.F., Numerical Modeling of Internal Waves Generated by Turbulent Wakes Behind Self-propelled and Towed Bodies in Stratified Media, Proceedings of International conference - Fluxes and Structures in Fluids , IPM RAS , Moscow , June 20-22, 2001.
11. [J43] Moshkin N.P., Mounradok N.P., A Fourth-Order Compact Finite Difference Scheme for the Flowing Through Problem of an Ideal Incompressible Fluid, The 7th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 7 2003), March 24-26, 2003, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 6 p.
12. [J44] Chernykh G. G., Moshkin N. P. , and Fomina A.V., Dynamics of Turbulent Wakes Behind Self-propelled and Towed Bodies in Stratified Media. ,The 7th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 7 2003), March 24-26, 2003, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 6 p.
13. [J45] Voropaeva O.F., Zudin A.N., Moshkin N.P., Chernykh G.G. , Internal waves, generated by turbulent wakes in stably stratified medium. Computational Technologies, **8**, No (2003), 36-48. (in Russian)
14. [J46] O. F. Voropayeva, N. P. Moshkin, and G. G. Chernykh , Internal Waves Generated by Turbulent Wakes in a Stably Stratified Medium ,, Vol. 48, No. 9, 2003, pp. 517-521. Translated from Doklady Akademii Nauk, Vol. 392, No. 2, 2003, pp. 190–194. Original Russian Text Copyright © 2003 by Voropayeva, Moshkin, Chernykh Doklady Physics **48**, No 9 (2003), 517-521. (Translated from Doklady Akademii Nauk, Vol. 392, No. 2, 2003, pp. 190-194. )
15. [J47] G. CHERNYKH, N.P. Moshkin , O. F. VOROPAYEVA, Internal waves generated by turbulent wakes behind towed and self-propelled bodies in a stably stratified medium, Vol. 19, No. 1, pp. 1–16 (2004) Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, **19** No 1,(2004). 1-16 .
16. [J48] N. P. Moshkin, A. V. Fomina, G. G. Chernykh, On the numerical modeling of dynamics of turbulent wake behind towed body in linearly stratified media, 4, No 3/4 (2004), 3–31. Vestnik, Quart. J. of Novosibirsk State Univ., Series: math., mech. and informatics, **4**No 3/4 (2004), 3-31.
17. [J49] N.P. Moshkin, Peiangpob Mounnamprang, Streamfunction-vorticity numerical method for flowing through problem of ideal incompressible fluid within 2D domain, Proceedings of the 8-th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering, (ANSCSE- 8), 21-23 July 2004, Thailand, Suranaree University of Technology. pp. 450-453.
18. [J50] Srisertpol J., Rodpai A., N.P. Moshkin, Numerical algorithm for transfer function synthesise using experimental frequency response data, Proceedings of the 8-th Annual National Symposium on Computational

- Science and Engineering, (ANSCSE- 8), 21-23 July 2004, Thailand, Suranaree University of Technology. pp. 269-272.
19. [J51] N.P. Moshkin, A.V. Fomina, G.G. Chernykh, DYNAMICS OF PASSIVE SCALAR IN TURBULENT WAKES IN DENSITY STRATIFIED FLUIDS, Proceedings of the 8-th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering, (ANSCSE- 8), 21-23 July 2004, Thailand, Suranaree University of Technology, pp. 307-310.
  20. [J52] N.P. Moshkin, G.G. Chernykh, A.V. Fomina, anisotropy Decay of Turbulence in the Wake behind Towed Body in a Linearly Stratified Media, Proceedings of the 9-th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering, (ANSCSE- 9), March 23-25, 2005, Faculty of Science, Mahidol University, Rama6 Road, Bangkok, Thailand, pp. 269-279.
  21. [J53] Moshkin N.P., Chernykh G.G., Fomina A.V. Dynamics of drag turbulent wake in a linearly stratified media Progress in Computational Heat and Mass Transfer (Proceedings of 4-th ICCHMT, May 17-20, 2005, Paris-Cachan, France; Eds. R. Bennacer, A.A.Mohamad, M. Ganaoui, J.Sicard. LAVOISIER, 2005.-V.1.-P. 535-540.
  22. [J54] N.P.Moshkin, A.V. Fomina, G.G.Chernykh, ON THE INFLUENCE OF SMALL TOTAL MOMENTUM IMBALANCE ON TURBULENT WAKE DYNAMICS IN THE LINEARLY STRATIFIED MEDIUM, Mathematical Modeling, 17, No. 1, (2005). 19-33.
  23. [J55] G. G. Chernykh, A. V. Fomina, N. P. Moshkin. Passive scalar dynamics in turbulent wakes of bodies moving in a linearly stratified medium Russ. J. Numer. Anal. Math Modelling <i>, 2005. – Vol. 20. – No.5 – P. 402-424.
  24. [J56] N.P.Moshkin, A. V. Fomina, G. G. Chernykh. Numerical Modelling of Dynamics of Turbulent Wake behind Towed Body in the Linearly Stratified Medium, Mathematical Modeling , 21, No. 21, pp. 50-77
  25. [J57] Chernykh G.G., Fomina A.V., Moshkin N.P., Numerical models of drag wake dynamics in linearly stratified fluid. RJNAMM, 2006. V.21, No. 5. P. 411-426.
  26. [J58] Chernykh G.G., Demenkov A.G., Ilyushin B.B., Kostomakha V.A., Moshkin N.P., Voropayeva O.F., Numerical modeling of free turbulent flows. FLUXES AND STRUCTURES IN FLUIDS-2005. Selected papers. Eds. Yu.D. Chashechkin, V.G. Baydulov. Inst. for Problems in Mech. RAS, Moscow, 2006. P. 100-108.
  27. [J59] Chernykh G.G., Demenkov A.G., Ilyushin B.B., Kostomakha V.A., Moshkin N.P., Voropayeva O.F., Numerical modeling of turbulent wakes. THIRD International Summer Scientific Workshop «HIGH SPEED HYDRODYNAMICS AND NUMERICAL SIMULATION». PROCEEDINGS. June 22-28, 2006, Kemerovo, Russia, P.497-504.

28. [J60] Surattana Sunghul, Moshkin N.P., Numerical simulation of steady viscous flow past two rotating circular cylinders. *Suranaree Journal of science and technology*, 2006, **Vol. 13**, No.3, pp. 219-233.
29. [J61] Damrongsak Y. and Moshkin N.P., Finite Volume Method for Incompressible Flowing through Problem Driven by a Pressure Drop, Proceedings, ANSCSE10, 10th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering, March 22-24, 2006, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, pp. 473-478.
30. [J62] Moshkin N.P., Surattana Sunghul, Numerical Simulation of Flow Past Two Rotating Circular Cylinders, Proceedings, ANSCSE10, 10th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering, March 22-24, 2006, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, pp. 479-484.
31. [J63] N.P. Moshkin, A. V. Fomina, G. G. Chernykh. Numerical modeling of turbulent wakes dynamics behind towed body in a linearly stratified media. *Boundary value problems and Mathematical modeling. Proceedings of 8-th Annual Russian scientific conference*, 1-3 December 2006, Novokuznetsk, pp. 61-68
32. [J64] N.P. Moshkin, A.V. Fomina, G.G. Chernykh, NUMERICAL MODELLING OF DYNAMICS OF TURBULENT WAKE, BEHIND TOWED BODY IN THE LINEARLY STRATIFIED MEDIUM, *Mathematical Modeling*, **19**, No. 1, (2007). 29-56.
33. [J64] Chernykh, G.G., Moshkin, N.P., Fomina, A.V., Dynamics of turbulent wake with small excess momentum in stratified media, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* (2008), doi: 10.1016/j.cnsns.2008.01.014

#### Conference International and National

1. [R1] Chernykh G.G., Moshkin N.P., Voropayeva O.F., Numerical Modelling of Internal Waves, Generated by turbulent wakes behind self-propelled and towed bodies in stratified media. Abstracts, Kyoto, July 9-14, 2000, First Internat. Conf. On CFD, Kyoto Research Park, pp. 153-154.
2. [R2] N. P. Moshkin and P. Mounnunprang, On Numerical Algorithm for the Steady Euler Equations for a Flowing-Through Problem, The 4th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering March 27-29, 2000 Kasetsart University, Bangkok, Thailand
3. [R3] Moshkin N.P., NUMERICAL STUDY OF NATURAL CONVECTION IN A RECTANGULAR ENCLOSURE FILLED WITH TWO IMMISCIBLE FLUIDS. CHT'01: Advance in computational heat transfer II, Editors, Graham de Vahl Davis and Eddie Leonardi., May 2001, Palm Cove, Queensland, Australia.

4. [R4] Chernykh G.G., Moshkin N.P., and Voropayeva O.F., Numerical Modeling of Internal Waves Generated by Turbulent Wakes Behind Self-propelled and Towed Bodies in Stratified Media, Proceedings of International conference - Fluxes and Structures in Fluids , IPM RAS , Moscow , June 20-22, 2001.
5. [R5] Moshkin N.P., G.G. Chernykh and O.F. Voropayeva, Dynamics of turbulent wakes behind self-propelled and towed bodies in stratified media. Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics , Boston, US, June 17 - 20, 2003,.
6. [R6] Moshkin N.P., Numerical study of thermal convection in two immiscible fluid layers. BAILL 2002. An International Conference on Boundary and Interior Layers, Computational & Asymptotic Methods, The University of Western Australia, Perth, WA, 8th - 12th July, 2002.
7. [R7] Moshkin N.P., Finite difference methods, Progress in Mathematics 8-9 May, 2003, Best Western Fortune Hotel, Bangkok, Thailand.
8. [R8] Yu. Chashechkin, G.G. Chernykh, N.P. Moshkin, O.F. Voropaeva, A.G. Demenkov, B.B. Ilyushin, V.A. Kostomakha, "Mathematical modelling of free turbulent flows", INTERNATIONAL CONFERENCE KOLMOGOROV AND CONTEMPORARY MATHEMATICS , (Moscow, June 16 - 21, 2003), IN COMMEMORATION OF THE CENTENNIAL of Andrei Nikolayevich Kolmogorov (25.IV.1903 - 20.X.1987)
9. [R9] G.G. Chernykh, N.P. Moshkin, and O.F. Voropayeva, Internal Waves, Generated By Turbulent Trace In Stably Stratified Medium, NEW MATHEMATICAL MODELS IN CONTINUUM MECHANICS: CONSTRUCTION AND INVESTIGATION, dedicated to the 85th anniversary of academician L.V. Ovsiannikov, Novosibirsk, May 10-15, 2004.
10. [R10] N.P. Moshkin, G. G. Chernykh and A.V. Fomina, Dynamics of turbulent wake with small excess momentum in stratified media, CHT-04: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN COMPUTATIONAL HEAT TRANSFER, On board MS Midnatsol, Norwegian Coastal Voyage 19-24 April, 2004.
11. [R11] N.P. Moshkin, G. G. Chernykh and A.V. Fomina, ON THE INFLUENCE OF SMALL TOTAL MOMENTUM IMBALANCE ON TURBULENT WAKE DYNAMICS IN THE LINEARLY STRATIFIED MEDIUM, 12th INTERNATIONAL CONFERENCE ON METHODS OF AEROPHYSICAL RESEARCH (ICMAR 2004), 28 June - 4 July 2004, Akademgorodok, Novosibirsk, Russia , Dedicated to Academician of Russian Academy of Sciences Prof., Vladimir Struminskii
12. [R12] Yu.D.Chashechkin , G.G. Chernykh,N.P. Moshkin, A.G. Demenkov, B.B. Ilyushin, V.A. Kostomakha, O.F. Voropayeva, Mathematical modeling of free turbulent flows , 12th INTERNATIONAL CONFERENCE

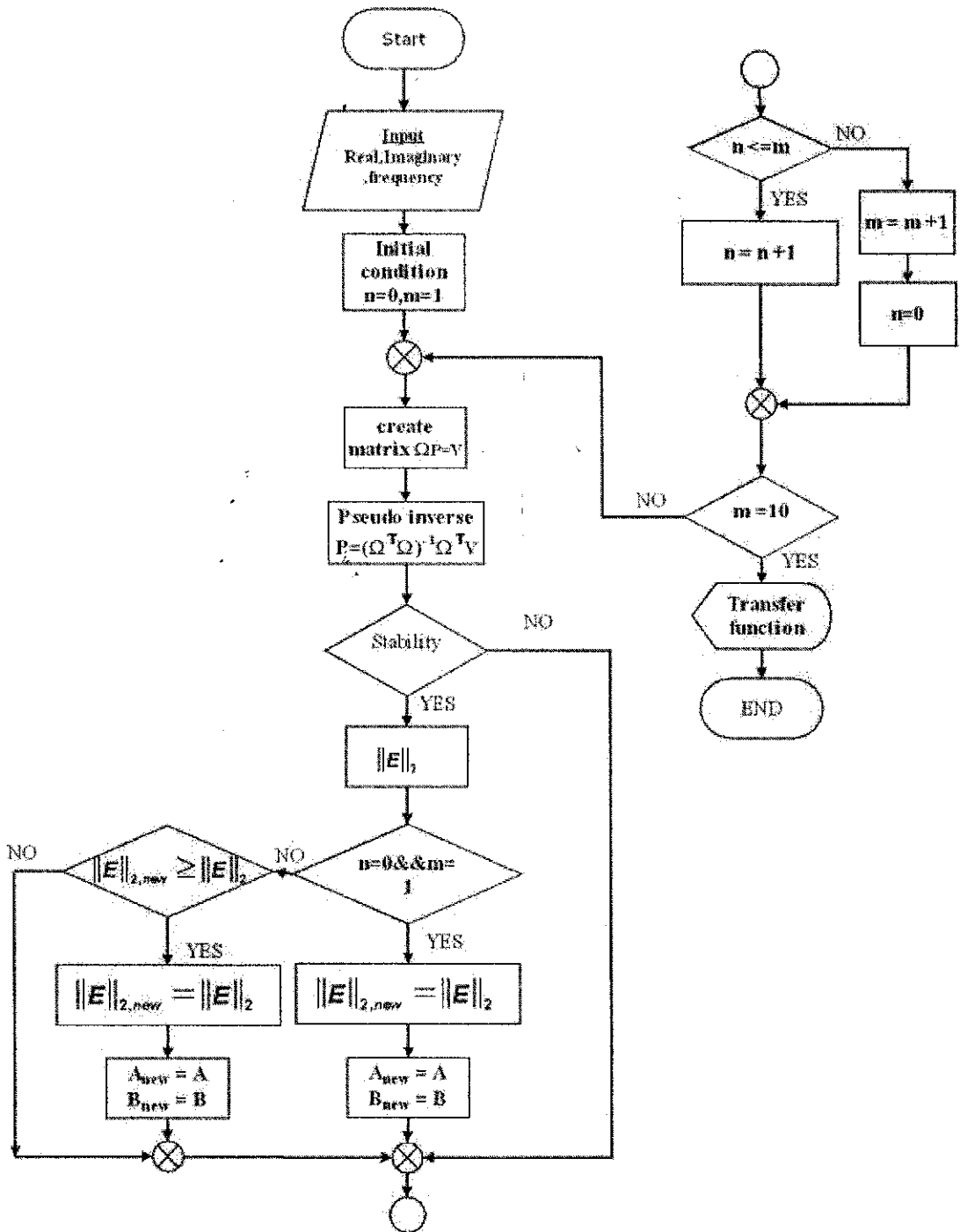
22. [R22] G.G. Chernykh, A.G. Demenkov, B.B.Ilyushin, V.A. Kostomakha, N.P. Moshkin, O.F. Voropayeva. Numerical modelling of free turbulent flows, IX National Russian Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Niznii Novgorod, Russia, 22-28 August, 2006.
23. [R23] N.P.Moshkin, A. V. Fomina, G. G. Chernykh. Numerical modeling of turbulent wakes dynamics behind towed body in a linearly stratified media. Boundary value problems and Mathematical modeling. Proceeding of 8-th Annual Russian scientific conference, 1-3 December 2006, Novokuznetsk.
24. [R24] G.G.Chernykh, A.V.Fomina, N.P.Moshkin, DYNAMICS OF TURBULENT WAKE WITH SMALL TOTAL EXCESS MOMENTUM IN A LINEARLY STRATIFIED MEDIA, FLUXES AND STRUCTURES IN FLUIDS  
St.-Petersburg, Russia, July 02-05, 2007.
25. [R25] N. P. Moshkin, G. G. Chernykh, A. V. Fomina, Application of splitting methods to a hierarchy of RANS models of far turbulent wake behind towed body in linearly stratified media, The Fifth International Conference on Dynamic Systems and Applications, Atlanta, USA, May 30 -June 2, 2007.
26. [R26] G.G. Chernykh, A.V. Fomina, N.P. Moshkin, NUMERICAL MODELING OF DYNAMICS OF TURBULENT WAKE BEHIND TOWED BODY IN THE LINEARLY STRATIFIED MEDIUM, 13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON METHODS OF AEROPHYSICAL RESEARCH (ICMAR 2007)  
February 5-10, 2007, Akademgorodok, Novosibirsk, Russia.

#### งานวิจัยที่สนใจ (Research interest)

Computational Fluid Dynamics, Numerical Methods in Fluids, Mathematical and Numerical Modeling,  
Computational Mathematics

#### ทุนการศึกษา / รางวัลที่ได้รับ (Scholarship / fund / Award)

**Royal Golden Jubilee Scholarship.**



รูปที่ ก1 แผนผัง โปรแกรมของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก