ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246937

การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานอย่างเต็มที่สำหรับการคัดสรรทรัพยากรแบบไดนามิกของโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ

นายปริญ พุ่งสิริวิโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b00259491

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246937

การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานอย่างเต็มที่สำหรับการจัดสรรทรัพยากรแบบไดนามิคของโปรแกรมประยุกต์ผ่านเว็บ

นายปวิธ ฟุ้งสิริวิโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรร่มคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5270389221

UTILIZING IDLE COMPUTING RESOURCES FOR DYNAMIC RESOURCE ALLOCATION OF WEB-BASED APPLICATIONS

Mr. Pawit Fungsiriwirot

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานอย่างเต็มที่สำหรับการจัดสรรทรัพยากรแบบไดนามิคของโปรแกรมประยุกต์ผ่านเว็บ
โดย	นายปวิธ ฟุ้งสิริวิโรจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระ เหมืองสิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิรมย์โสภา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภุชงค์ อุทโยภาศ)

ปวิธ ฟุ้งสิริวิโรจน์ : การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานอย่างเต็มที่สำหรับการจัดสรรทรัพยากรแบบไดนามิคของโปรแกรมประยุกต์ผ่านเว็บ. (UTILIZING IDLE COMPUTING RESOURCES FOR DYNAMIC RESOURCE ALLOCATION OF WEB-BASED APPLICATIONS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์, 103 หน้า.

246937

การพัฒนาแอปพลิเคชันในปัจจุบันมีแนวโน้มอยู่ในรูปแบบของเว็บแอปพลิเคชันมากขึ้น และมีเว็บแอปพลิเคชันจำนวนไม่น้อยที่มีรูปแบบการใช้งานในปริมาณมากเป็นช่วงๆ ในลักษณะตามฤดูกาล ทำให้หน่วยงานทั่วไปมักจะอุทิศทรัพยากรเพื่อให้ระบบสามารถรองรับการให้บริการที่เพียงพอตามระดับความต้องการโดยเฉลี่ยเท่านั้น ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวอาจส่งผลให้เว็บแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ที่มีอยู่ในระบบไม่สามารถรองรับการใช้งานในช่วงที่มีความต้องการที่สูงได้ สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหานี้ เช่น การเสนอเทคนิคการรวมหลายเว็บแอปพลิเคชันให้ร่วมกันใช้ทรัพยากรบนเครื่องเซิร์ฟเวอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง หรือเทคนิคการขยายทรัพยากรสำหรับเว็บแอปพลิเคชันตามปริมาณการใช้งาน อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในส่วนของเครื่องเซิร์ฟเวอร์สำรองที่จะใช้เป็นทรัพยากรเสริมในเทคนิคเหล่านี้ก็เป็นประเด็นสำคัญสำหรับองค์กรที่มีงบประมาณที่จำกัด

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการจัดสรรทรัพยากรแบบไดนามิคสำหรับโปรแกรมประยุกต์ผ่านเว็บประเภทที่มีการใช้งานมากเป็นบางช่วงเวลา โดยอาศัยทรัพยากรจากเครื่องเวิร์กสเตชันที่มีอยู่แล้วในหน่วยงาน และไม่ได้ถูกใช้งานอย่างเต็มที่ตลอดเวลา มาใช้เป็นทรัพยากรเสริมให้กับระบบในช่วงที่มีผู้ใช้งานเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายแทนที่จะต้องใช้ในการอุทิศเครื่องเซิร์ฟเวอร์สำรองให้กับระบบ รวมถึงจะช่วยให้เกิดการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรที่ไม่ได้ถูกใช้งานอย่างเต็มที่ให้เกิดประโยชน์สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ทำการนำเสนอขั้นตอนวิธีในการขยายขนาดของระบบเว็บแอปพลิเคชัน ให้เหมาะสมกับการใช้ทรัพยากรจากเครื่องเวิร์กสเตชัน โดยสามารถคาดการณ์แนวโน้มของลักษณะภาระงานล่วงหน้า และสามารถขยายขนาดของระบบเว็บแอปพลิเคชันได้ในลักษณะหลายเครื่องตามจำนวนภาระงานที่เพิ่มขึ้นด้วย

ภาควิชา...วิศวกรรมคอมพิวเตอร์..... ลายมือชื่อนิสิต...ปวิธ ฟุ้งสิริวิโรจน์.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมคอมพิวเตอร์..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา....2553.....

5270389221 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : WEB APPLICATION / VIRTUALIZATION / RESOURCE UTILIZATION / SCALABILITY

PAWIT FUNGSIRIWIROT : UTILIZING IDLE COMPUTING RESOURCES FOR DYNAMIC RESOURCE ALLOCATION OF WEB-BASED APPLICATIONS.

ADVISOR : NATAWUT NUPAIROJ, Ph.D., 103 pp.

246937

At present, new applications are tended to be developed using web-based technology. And many web-based applications exhibit seasonal behaviors such that they are usually being used very lightly most of the time and heavily used from time to time. As the results, organizations usually provide dedicated resources for these systems to support only average workloads. This can lead to inadequate resources during peak periods. In order to solve this problem, several techniques such as web application consolidation on a powerful server or dynamic scaling of web application have been proposed. However the cost of dedicated backend servers required by these techniques can be quite expensive.

This thesis proposes dynamic resource management for seasonal web-based application using remaining capacity of idle workstations to share the load during the peak workload period instead of using a large number of dedicated backend servers. This method will reduce the cost of dedicate servers and increase the utilization of idle computing resources. In addition, we propose the dynamic scaling of web application algorithm suitable for workstation environment by predicting workload in advance and adding several servers at once to handle sudden load surges.

Department : Computer Engineering Student's Signature ปวิธ ฟังสิริวิโรจน์

Field of Study : Computer Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มิอาจสำเร็จสมบูรณ์ได้หากปราศจากความช่วยเหลือ ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และความอนุเคราะห์ต่างๆ จากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์ ที่คอยให้ความเมตตา รวมทั้งโอกาสและสิ่งที่ดีแก่ผู้วิจัยเสมอมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระ เหมืองสิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกริก ภิรมย์โสภา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภุชงค์ อุทโยภาศ ประธานกรรมการและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่สละเวลามาให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้อันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย พี่สาว น้องสาว และญาติทุกคนที่บ้านของผู้วิจัยที่คอยสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ที่เปรียบเสมือนแรงผลักดันและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 4

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย..... 5

1.5 คุณค่าทางวิชาการ..... 5

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์..... 5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1.1 เทคโนโลยีการจำลองระบบเสมือนจริง (Virtualization Technology).... 6

2.1.2 โครงการอัลตรามังค์กี้ (Ultra Monkey Project)..... 9

2.1.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis)..... 11

2.1.4 ตัวอย่างเว็บแอปพลิเคชันและเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองลักษณะของภาระงาน (Sample Web Application and Workload Generation).... 12

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 16

2.2.1 แนวทางในการรวมหลายเว็บแอปพลิเคชันให้ร่วมกันใช้ทรัพยากรบนเครื่องเซิร์ฟเวอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง..... 16

2.2.2 แนวทางการขยายทรัพยากรสำหรับเว็บแอปพลิเคชันตามปริมาณการใช้งาน..... 17

บทที่ หน้า

2.2.3 แนวทางการแก้ปัญหาโดยอาศัยทรัพยากรที่มีอยู่แล้วในระบบและไม่ได้ถูกใช้งานอย่างเต็มที่มาใช้เป็นทรัพยากรเสริม..... 18
3 การจัดสรรทรัพยากรสำหรับโปรแกรมประยุกต์ผ่านเว็บโดยอาศัยทรัพยากรจากเครื่องเวิร์กสเตชัน..... 19
3.1 บทกล่าวนำ..... 19
3.2 ภาพรวมแนวความคิดด้านโครงสร้างสถาปัตยกรรม..... 19
3.2.1 ส่วนกระจายภาระงาน (Load Balancer)..... 20
3.2.2 แอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์หลักของระบบ (Main Application Server)..... 20
3.2.3 เครื่องเวิร์กสเตชันพลูในระบบ (Workstation Pool)..... 21
3.2.4 ส่วนตรวจสอบสถานะของแต่ละแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ (Application Server Monitor)..... 22
3.2.5 ขั้นตอนวิธีการปรับขนาดของระบบเว็บแอปพลิเคชัน (Scaling Algorithm)..... 23
3.2.6 ส่วนควบคุมการใช้งานของเครื่องเวิร์กสเตชันพลู (Workstation Pool Manager)..... 24
3.3 ขั้นตอนวิธีการปรับขนาดของเว็บแอปพลิเคชันแบบไดนามิค (Dynamic Scaling Algorithm)..... 27
3.3.1 ขั้นตอนวิธีการปรับขนาดของระบบเว็บแอปพลิเคชันในลักษณะทีละเครื่อง (Dynamic Scaling Algorithm: Scale Each)..... 30
3.3.2 ขั้นตอนวิธีการปรับขนาดของระบบเว็บแอปพลิเคชันในลักษณะทีละหลายเครื่องโดยใช้วิธีการคาดการณ์ล่วงหน้า (Dynamic Scaling Algorithm: Scale Predict)..... 36
4 การทดสอบและผลการทดสอบงานวิจัย..... 45
4.1 ตัววัดสมรรถนะของระบบ (Performance Metrics)..... 46
4.2 การทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพในการรองรับปริมาณภาระงานของแต่ละเว็บแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ในระบบ..... 46
4.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 46
4.2.2 สภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง..... 48
4.2.3 ผลการทดสอบ..... 48

บทที่ หน้า

4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง..... 52
4.3 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดสรรทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก..... 52
4.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 53
4.3.2 สภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง..... 56
4.3.3 ผลการทดสอบ..... 61
4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง..... 68
4.4 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับวิธีการจัดสรรทรัพยากรของระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีแนวโน้มอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 71
4.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 72
4.4.2 สภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง..... 75
4.4.3 ผลการทดสอบ..... 76
4.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง..... 82
4.5 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับวิธีการจัดสรรทรัพยากรของระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 84
4.5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 85
4.5.2 สภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง..... 88
4.5.3 ผลการทดสอบ..... 89
4.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง..... 95
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 97
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 97
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 99
รายการอ้างอิง..... 101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการรองรับปริมาณภาระงานของแต่ละเว็บแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์	48
4.2	ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก	61
4.3	ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่แต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันใช้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณไม่มาก	62
4.4	ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันในช่วงเวลา 20 นาทีแรกที่ระบบเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว	77
4.5	ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่แต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันใช้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานในช่วงเวลา 20 นาทีแรกที่ระบบเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว	77
4.6	ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน	90
4.7	ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่แต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันใช้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน	90

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แสดงแนวโน้มของงานด้านเว็บแอปพลิเคชันในปัจจุบัน [1]	1
1.2	กราฟแสดงจำนวนครั้งในการคลิกเข้าใช้งานในหน้าเว็บลงทะเบียนเรียนของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี ค.ศ. 2009 [2]	2
2.1	กราฟแสดงทรัพยากรในคอมพิวเตอร์ซึ่งถูกใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่	6
2.2	แสดงระดับชั้นเสมือนในสถาปัตยกรรม x86	7
2.3	แสดงตารางเปรียบเทียบเทคนิคในการทำเวอร์ชวลไลเซชันที่แตกต่างกัน	8
2.4	แสดงลักษณะภาระงานของระบบเว็บไซต์ www.france98.com ในช่วง 1 สัปดาห์ [18]	14
2.5	แสดงลักษณะปริมาณภาระงานของระบบ Play-along เว็บไซต์ [19]	14
2.6	แสดงลักษณะปริมาณภาระงานของระบบ Chilean Election Site [19]	15
2.7	แสดงลักษณะภาระงานในช่วง 20 นาทีแรกที่ระบบ Play-along เว็บไซต์เริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว [19]	15
2.8	แสดงลักษณะภาระงานในช่วง 15 นาทีแรกของระบบ Chilean Election Site ที่อัตราการเข้าใช้งานเริ่มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน [19]	16
3.1	แสดงภาพรวมของระบบที่นำเสนอ	20
3.2	แสดงวงจรชีวิตของเครื่องเวิร์กสเตชัน	21
3.3	แสดงภาพรวมการทำงานในส่วนการควบคุมการใช้งานของเครื่องเวิร์กสเตชันพลู	24
3.4	แสดงแผนภาพขั้นตอนวิธีการปรับขนาดของระบบเว็บแอปพลิเคชันในลักษณะทีละเครื่อง	29
3.5	แสดงแผนภาพขั้นตอนวิธีการปรับขนาดของระบบเว็บแอปพลิเคชันในลักษณะทีละหลายเครื่องโดยใช้วิธีการคาดการณ์ล่วงหน้า	35
4.1	แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่แต่ละเว็บแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ใช้ในการตอบสนองต่อผู้ใช้งาน	51
4.2	แสดงค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่แต่ละเว็บแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ใช้ในการตอบสนองต่อผู้ใช้งาน	51

ภาพที่ หน้า

4.3 แสดงลักษณะของภาระงานที่มีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก..... 57
4.4 แสดงสภาพแวดล้อมของระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการจัดสรรทรัพยากรแบบสถิต..... 58
4.5 แสดงสภาพแวดล้อมของระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดของแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ในลักษณะทีละเครื่อง..... 59
4.6 แสดงสภาพแวดล้อมของระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดของแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ในลักษณะทีละหลายเครื่อง..... 60
4.7 กราฟแสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก..... 64
4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่แต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันใช้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก..... 64
4.9 กราฟแสดงจำนวนเครื่องแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์จากการทำนายและการตรวจพบในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก..... 65
4.10 กราฟแสดงจำนวนเครื่องแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ที่สามารถให้บริการได้อย่างสมบูรณ์ในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก..... 65
4.11 กราฟแสดงปริมาณเครื่องเวิร์กสเตชันที่ผู้ใช้งานเวิร์กสเตชันสามารถใช้บริการได้ในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มาก..... 66
4.12 กราฟแสดงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดในลักษณะทีละเครื่องในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้น..... 67
4.13 แสดงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดในลักษณะทีละหลายเครื่องโดยการคาดการณ์ล่วงหน้าในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานค่อยๆ เพิ่มขึ้น..... 67

ภาพที่ หน้า

4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้น..... 68
4.15 แสดงลักษณะภาระงานในช่วงเวลา 20 นาทีแรกที่ระบบเว็บแอปพลิเคชันเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 76
4.16 กราฟแสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันในช่วงเวลา 20 นาทีแรกที่ระบบเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว. 78
4.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่แต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันใช้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานในช่วงเวลา 20 นาทีแรกที่ระบบเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 78
4.18 แสดงจำนวนเครื่องแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์จากการทำนายและการตรวจพบในช่วงเวลา 20 นาทีแรกที่ระบบเว็บแอปพลิเคชันเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 79
4.19 กราฟแสดงจำนวนเครื่องแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ที่สามารถให้บริการได้อย่างสมบูรณ์ในช่วง 20 นาทีแรกที่ระบบเว็บแอปพลิเคชันเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 79
4.20 กราฟแสดงปริมาณเครื่องเวิร์กสเตชันที่ผู้ใช้งานเวิร์กสเตชันสามารถใช้บริการได้ในช่วงเวลา 20 นาทีแรกที่ระบบเว็บแอปพลิเคชันเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 80
4.21 กราฟแสดงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดในลักษณะทีละเครื่องในช่วง 20 นาทีแรกที่ระบบเริ่มมีการเข้าใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 81
4.22 แสดงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดในลักษณะทีละหลายเครื่องในช่วง 20 นาทีแรกที่ระบบเริ่มมีการเข้าใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว..... 81
4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันในช่วง 20 นาทีแรกที่ระบบเริ่มมีการเข้าใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว.. 82
4.24 แสดงภาระงานในช่วงเวลา 15 นาทีแรกที่ระบบเว็บแอปพลิเคชันเริ่มมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 89

ภาพที่ หน้า

4.25 กราฟแสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 91

4.26 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่แต่ละระบบเว็บแอปพลิเคชันใช้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 91

4.27 กราฟแสดงจำนวนเครื่องแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์จากการทำนายและการตรวจพบในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 92

4.28 กราฟแสดงจำนวนเครื่องแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ที่สามารถให้บริการได้อย่างสมบูรณ์ในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 92

4.29 กราฟแสดงปริมาณเครื่องเวิร์กสเตชันที่ผู้ใช้งานเวิร์กสเตชันสามารถใช้บริการได้ในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีอัตราการเข้าใช้งานในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 93

4.30 กราฟแสดงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดในลักษณะทีละเครื่องในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 94

4.31 กราฟแสดงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้วิธีการขยายขนาดในลักษณะทีละหลายเครื่องในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 94

4.32 กราฟเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรในระบบเว็บแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมที่ภาระงานมีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหัน..... 95