วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 27 ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2560
The Journal of KMUTNB., Vol. 27, No. 3, Jul.–Sep. 2017

บทความวิจัย

ผลกระทบของการจองหน่วยความจำต่อการใช้พลังงานในเครื่องจักรเสมือน: กรณีศึกษาไมโครซอฟท์ไฮเปอร์-วี

วิภูดล วัชรสาคร* และ บวร ปภัสราทร
คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08–1259–0504 อีเมล: keromiros_art@hotmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.006
รับเมื่อ 7 เมษายน 2559 ตอบรับเมื่อ 28 กันยายน 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 27 มิถุนายน 2560
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีเซิร์ฟเวอร์เสมือนเกิดขึ้นจากการนำเอาเซิร์ฟเวอร์หลาย ๆ เครื่องมารวมอยู่ในเครื่องเซิร์ฟเวอร์เครื่องเดียว ซึ่งจำเป็นที่ต้องมีกรรมวิธีการจองหน่วยความจำเข้ามาช่วย แต่เดิมวิธีการจองหน่วยความจำบนเครื่องจักรเสมือนมีเพียงการจองแบบคงที่เท่านั้น ในภายหลัง Microsoft Hyper-V ได้นำเสนอวิธีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการจัดการบริหารหน่วยความจำ แต่กรรมวิธีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคนั้น จะมีการใช้ทรัพยากรบนเซิร์ฟเวอร์เพิ่มเติมในการทำงานด้วย งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครื่องจักรเสมือนที่มีวิธีการจองหน่วยความจำแตกต่างกันคือ แบบคงที่ และแบบไดนามิค โดยวัดการใช้พลังงานของแอปพลิเคชันตัวอย่างประเภท I/O และ Memory-intensive บนสภาพแวดล้อมการทำงานเดียวกันบนเซิร์ฟเวอร์เสมือน พบว่า แอปพลิเคชันที่ทำงานบนเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคจะมีการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยมากกว่าเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบคงที่อยู่ที่ 5–10% แต่ค่าการใช้พลังงานส่วนเกินนี้สามารถลดลงเหลือ 0.16–1.02% ได้ด้วยการปรับตั้งค่า Memory Buffer ที่ 20% ขึ้นไป วิธีการจองหน่วยความจำแบบคงที่นี้จะมีประโยชน์สำหรับนำไปใช้บนเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่ต้องการประหยัดการใช้พลังงานในการทำงานประเภท I/O และ Memory-intensive และหากจำเป็นต้องใช้วิธีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคในการทำงานประเภท I/O-intensive ควรมีการปรับค่า Memory Buffer ไว้ที่ 20% ขึ้นไป เพื่อผลลัพธ์ในการประหยัดพลังงานที่ดีที่สุดสำหรับเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิค

คำสำคัญ: การจองหน่วยความจำ, เครื่องจักรเสมือน, ไฮเปอร์-วี

การอ้างอิงบทความ: วิภูดล วัชรสาคร และ บวร ปภัสราทร, "ผลกระทบของการจองหน่วยความจำต่อการใช้พลังงานในเครื่องจักรเสมือน: กรณีศึกษาไมโครซอฟท์ไฮเปอร์-วี," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 3, หน้า 535–545, ก.ค.–ก.ย. 2560

Research Article

Effect of Memory Allocation on Power Consumption in Virtual Machine: Case Study Microsoft Hyper-V

Wipudon Watcharasakhon* and Borworn Papasratorn
School of Information Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08–1259–0504, E–mail: keromiros_art@hotmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.006
Received 7 April 2016; Accepted 28 September 2016; Published online: 27 June 2017
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Virtualization technology consolidates a number of servers to work together in a single hardware platform. Since memory is a shared resource in the virtual environment, it is necessary to allocate memory to all virtual servers. Initially, static memory allocation was the only way to allocate memory to virtual servers. At present, it is possible to have dynamic memory allocation, which has been introduced by Microsoft Hyper-V. However, this allocation requires some resources to be performed that cause overhead costs regarding energy consumption. Therefore, this research was performed in order to find differences in the power consumption in the virtual server environment when using static and dynamic memory allocation. The experiment was set up to measure power consumption on I/O and memory-intensive applications in the same virtual server environment; one experiment used static memory allocation and the other used dynamic memory allocation. We found that the power consumption of the dynamic memory allocation was 5–10% more than that of the static memory allocation, and this number can be reduced to 0.16–1.02% by setting the memory buffer value to 20%. In application requirements focusing on energy savings, it is recommended that the static memory allocation should be applied to both I/O and memory-intensive applications . If the dynamic memory allocation is a must in virtual machines, we recommend setting up the memory buffer value to 20% for the best results in terms of energy consumption with virtual servers.

Keywords: Memory Allocation, Virtual Machine, Hyper-V

Please cite this article as: W. Watcharasakhon and B. Papasratorn, "Effect of memory allocation on power consumption in virtual machine: Case study Microsoft Hyper-V," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 27, no. 3, pp. 535–545, Jul.–Sep. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีเซิร์ฟเวอร์เสมือน x86 บนระบบ Microsoft Hyper-V นั้นได้รับความนิยมมากขึ้น [1] ด้วยจุดเด่นของระบบที่เป็น Micro-kernelized Hypervisor ซึ่งสามารถทำงานกับฮาร์ดแวร์ (Hardware) ได้หลากหลายมากกว่าระบบเซิร์ฟเวอร์เสมือนอื่นๆ ที่เป็นแบบ Monolithic Hypervisors เช่น VMware ESXi [2] ประกอบกับความง่ายในการติดตั้งระบบและใช้งาน เป็นผลผู้ใช้งานทั่วไปสามารถเข้าถึงระบบเซิร์ฟเวอร์เสมือนได้มากขึ้น ทำให้ระบบเซิร์ฟเวอร์เสมือนไม่จำกัดอยู่แค่ในระบบองค์กรขนาดใหญ่อีกต่อไป เพราะบริษัทขนาดเล็กและผู้ใช้งานทั่วไปสามารถติดตั้งระบบได้จากคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการสมัยใหม่ เช่น Microsoft Windows 8 เป็นต้นไป รวมถึง Microsoft Windows Server 2008 ขึ้นไปอีกด้วย [3]

ความสำเร็จของเซิร์ฟเวอร์เสมือนบนระบบ Hyper-V นั้นจำเป็นที่จะต้องมีการจัดสรรทรัพยากรโดยการช่วยเหลือของ Hypervisor เช่นเดียวกับระบบอื่นๆ แต่ใน Hyper-V นั้นได้นำเสนอรูปแบบการจัดการหน่วยความจำแบบใหม่ คือ การจองหน่วยความจำแบบไดนามิค (Dynamic Memory Allocation) มาใช้ ซึ่งจากระบบเดิมมีเพียงการจองหน่วยความจำแบบคงที่ (Static Memory Allocation) เท่านั้น จากการศึกษาพบว่าแม้การจองหน่วยความจำแบบไดนามิคจะช่วยให้การจัดการหน่วยความจำมีประสิทธิภาพมากขึ้น [4] แต่ต้องแลกมาซึ่งการใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ที่มากขึ้นด้วย ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเซิร์ฟเวอร์นั้นๆ

ด้วยความที่ Hyper-V นั้นเข้าถึงได้ง่ายและได้รับความนิยม [1] ทำให้ในปัจจุบัน เราสามารถพบ Hyper-V นั้น ถูกติดตั้งลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงใน Data Center หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป [2]–[4] ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบต่อการใช้พลังงานที่เกิดจากวิธีการจองหน่วยความจำทั้งสองแบบนั้นเป็นสิ่งที่ต้องการศึกษา งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเซิร์ฟเวอร์เสมือน Hyper-V ที่มีวิธีการจองหน่วยความจำแตกต่างกัน คือ แบบคงที่และแบบไดนามิค เพื่อหาวิธีการจองหน่วยความจำที่เหมาะสมกับสถานการณ์การใช้แอปพลิเคชันต่างๆ ให้เกิดการประหยัดพลังงาน และเพื่อตอบว่าควรใช้วิธีการจองหน่วยความจำแบบใด ในการใช้แอปพลิเคชันรูปแบบใดเพื่อให้มีการประหยัดพลังงานที่ใช้ในเซิร์ฟเวอร์เสมือน Microsoft Hyper-V โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการทดลองในระบบ Single-Machine และเลือกแอปพลิเคชันที่นำมาทดสอบเป็นรูปแบบและประเภทที่สามารถพบได้มากโดยทั่วไปในการใช้งานปัจจุบัน และเป็นแอปพลิเคชันที่มีลักษณะของการทำงานที่ส่งผลกระทบกับระบบการจองหน่วยความจำ [5] เพื่อให้เกิดเป็นแนวทางและความรู้ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ตั้งแต่ระบบเล็กๆ ไปจนถึงระบบที่ใหญ่ขึ้นได้ต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซิร์ฟเวอร์เสมือนถูกสร้างขึ้นด้วยแนวคิดที่ต้องการลดการใช้พลังงาน รวมถึงต้องการลดค่าใช้จ่ายด้านต่างๆ ในการดูแลเครื่องเซิร์ฟเวอร์กายภาพภายใน Data Center โดยวิธีการรวมเครื่องเซิร์ฟเวอร์หลายเครื่องเข้าด้วยกัน [6] ซึ่งการรวมเครื่องเซิร์ฟเวอร์เข้าด้วยกันนี้ กระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีจำลองเสมือนจริง [7] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่เป็นพื้นฐานของเครื่องจักรเสมือน ทำหน้าที่จำลององค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์เอาไว้ เช่น ซีพียูหน่วยความจำ หน่วยความจำสำรอง (Storage) อุปกรณ์เครือข่าย (Network Device) รวมถึงอุปกรณ์อินพุตเอาต์พุต (I/O Device) ให้สามารถถูกเข้าถึงและใช้งานร่วมกันได้โดยเซิร์ฟเวอร์เสมือนอื่นๆ ที่ทำงานอยู่บนเครื่องเซิร์ฟเวอร์กายภาพเดียวกัน [6]–[8] การจำลองฮาร์ดแวร์เหล่านี้จะทำผ่าน Hypervisor ซึ่งจะมีหน้าที่เป็นตัวแทนติดต่อ [9], [10] และจัดสรรทรัพยากรบนเซิร์ฟเวอร์กายภาพให้เพียงพอกับความต้องการของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่ทำงานอยู่บนเซิร์ฟเวอร์กายภาพในขณะนั้น

ในระบบเซิร์ฟเวอร์เสมือน Hypervisor มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากสามารถจำแนก Hypervisor บนเซิร์ฟเวอร์เสมือน x86 เป็น 2 ประเภทคือ Type 1 Hypervisor และ Type 2 Hypervisor โดย Type 1 Hypervisor จะทำงานโดยตรงกับฮาร์ดแวร์ของเครื่องเซิร์ฟเวอร์กายภาพโดยไม่ต้องผ่านชั้นของระบบปฏิบัติการ (OS) ทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าและมีความสามารถหลากหลายกว่า Type 2 Hypervisor ซึ่งต้องทำงานโดยการช่วยเหลือผ่านชั้นของระบบปฏิบัติการ [10] แต่ข้อดีสำหรับ Type 2 Hypervisor ก็คือ สามารถทำงานไปพร้อมกับระบบปฏิบัติการเดิมได้ในเครื่องเซิร์ฟเวอร์เครื่องเดียว

Type 1 Hypervisor สามารถแยกออกได้อีกเป็นแบบ Monolithic Hypervisor เช่น VMware ESXi และแบบ Micro-kernelized Hypervisors เช่น Hyper-V [2] โดยทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันที่ แบบ Monolithic หรือเรียกว่า Full Virtualization ตัวระบบปฏิบัติการเซิร์ฟเวอร์เสมือน (Guest OS) ไม่จำเป็นต้องปรับแต่งใดๆ เพื่อสามารถทำงานบน Hypervisor แต่ข้อเสียคือความเข้ากันได้ของฮาร์ดแวร์และไดรฟ์เวอร์ (Device Driver) ที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้ไม่สามารถติดตั้งลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้ง่ายนัก และต้องการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เซิร์ฟเวอร์เครื่องอื่น (Management Center) มาช่วยในการจัดการหากต้องการใช้ฟังก์ชันประเภท High Availability หรือ Fault Tolerance ทำให้ Monolithic Hypervisor มักถูกจำกัดการใช้งานอยู่ในองค์กรขนาดใหญ่ที่มีเครื่องเซิร์ฟเวอร์จำนวนมาก แต่สำหรับ Micro-kernelized Hypervisor เช่น Hyper-V นั้นสามารถใช้ฟังก์ชันดังกล่าวข้างต้นได้ในเครื่องเดียวไม่ต้องใช้เครื่องอื่นๆ มาช่วยจัดการ ทำให้สามารถลดจำนวนเครื่องเซิร์ฟเวอร์ที่ต้องใช้งานฟังก์ชันดังกล่าวได้ ช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงาน อีกทั้ง Micro-kernelized Hypervisor สามารถทำงานกับฮาร์ดแวร์โดยทั่วไปได้โดยส่วนใหญ่ ประกอบกับความสามารถที่จะทำงานได้กับ Guest OS ที่ปรับแต่ง Kernel หรือไม่ก็ได้ โดยที่ประสิทธิภาพการทำงานของ Micro-kernelized Hypervisor นั้นไม่แตกต่างจาก Monolithic Hypervisor [10] กรณีเช่นนี้ทำให้ Micro-kernelized Hypervisor สามารถเข้าถึงผู้ใช้ทั่วไปโดยไม่จำเป็นต้องเป็นองค์กรที่มีเครื่องเซิร์ฟเวอร์ขนาดใหญ่จำนวนมากได้ และเป็นตัวเลือกใช้งานอย่างดี สำหรับกลุ่มธุรกิจขนาดเล็กหรือแล็บทดลองทางเทคโนโลยีทั่วไปได้

ความสำเร็จของเซิร์ฟเวอร์เสมือน x86 ต่างๆ จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากขาดระบบการจัดการหน่วยความจำที่ดี ในระยะเริ่มแรกวิธีการจัดการหน่วยความจำของเซิร์ฟเวอร์เสมือน x86 จะเป็นแบบคงที่ กล่าวคือการจองหน่วยความจำให้แก่เซิร์ฟเวอร์เสมือนโดยมีการตั้งค่าขนาดของหน่วยความจำที่ต้องการจัดสรรให้เซิร์ฟเวอร์เสมือนแต่ละตัวใช้ไว้อย่างคงที่ล่วงหน้า ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดของหน่วยความจำที่จองให้กับเซิร์ฟเวอร์เสมือนได้จนกว่าจะทำการปิดระบบเซิร์ฟเวอร์เสมือนแล้วตั้งค่าขนาดของหน่วยความจำใหม่ ซึ่งวิธีการจัดการหน่วยความจำแบบนี้ในกรณีที่เซิร์ฟเวอร์เสมือนที่ทำงานอยู่นั้น ไม่ได้ใช้ทรัพยากรหน่วยความจำทั้งหมดที่ผู้ดูแลระบบจัดสรรให้ไปตลอดเวลาจะทำให้หน่วยความจำที่ถูกจัดสรรไว้ให้เซิร์ฟเวอร์เสมือนตัวนั้นไม่สามารถถูกเข้าถึงและนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้ ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรหน่วยความจำของเซิร์ฟเวอร์ไปอย่างไม่คุ้มค่าจึงเป็นเหตุให้มีผู้เสนอวิธีการจัดการจองหน่วยความจำของเซิร์ฟเวอร์เสมือนแบบใหม่เพิ่มขึ้นมา คือ การจองหน่วยความจำแบบไดนามิค ซึ่งเป็นการจองหน่วยความจำให้แก่เซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีความยืดหยุ่นกับขนาดของหน่วยความจำที่ถูกจองไปใช้ คือ Hypervisor จะจัดสรรหน่วยความจำให้กับเซิร์ฟเวอร์เสมือนตามที่เซิร์ฟเวอร์เสมือนใช้จริงในขณะนั้น [11], [12] ซึ่งขนาดของหน่วยความจำที่ถูกจัดสรรให้กับเซิร์ฟเวอร์เสมือนนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มหรือลดตลอดเวลา อาจมีการถูกกำหนดขอบเขตสูงสุดหรือต่ำสุดของการจองหน่วยความจำหรือไม่ก็ได้ [13] วิธีการจองหน่วยความจำแบบ "Dynamic Memory" ถูกนำมาใช้ใน Microsoft Hyper-V [11] โดย Hyper-V Integration Services จะทำหน้าที่สังเกตการณ์ปริมาณความต้องการใช้งานหน่วยความจำ

ของเซิร์ฟเวอร์เสมือน และจัดสรรหน่วยความจำให้เพียงพอต่อการใช้งานของ เซิร์ฟเวอร์เสมือนนั้น และคืนหน่วยความจำส่วนที่ไม่ใช้งานกลับคืนให้ Hypervisor เพื่อจัดสรรการใช้ประโยชน์อื่นๆ ต่อไป

พลังงานที่ถูกใช้ไปในการทำงานของเครื่องเซิร์ฟเวอร์นอกจากจะมาจากพลังงานฐาน (Base Power Consumption) ที่เซิร์ฟเวอร์ต้องใช้ในการทำงาน แล้วยังมีพลังงานที่เกิดมากจากการใช้ทรัพยากร (Resource Usage) บนเซิร์ฟเวอร์ด้วย [14] ซึ่งพบว่าทรัพยากรในเซิร์ฟเวอร์แต่ละตัวมีการกินพลังงานที่ไม่เท่ากัน โดยซีพียูจะมีการใช้พลังงานสูงสุด รองลงมาคือ หน่วยความจำ และดิสก์ (Disk) ซึ่งใช้พลังงานน้อยที่สุด และยังพบว่าปริมาณการใช้พลังงานจะมีความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์จากทรัพยากร กล่าวคือยิ่งมีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรมากเท่าไรยิ่งมีการกินพลังงานมากเท่านั้น [14] นั่นคือ หากมีกระบวนการใดๆ ในการทำงานของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการใช้ทรัพยากรส่วนเกินในการทำงาน (Overhead) จะทำให้การทำงานนั้นมีการใช้พลังงานมากเกินกว่าปกติด้วย

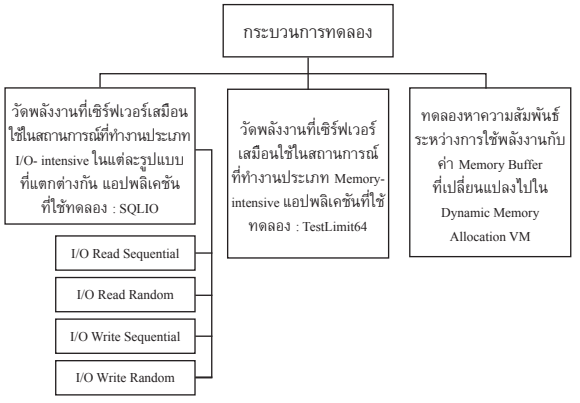
วิธีการวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเซิร์ฟเวอร์เสมือนมีผู้เสนอวิธีวัดอย่างมากมายหลายแบบ เช่น วิธีการวัดโดยการอ่านค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนเซิร์ฟเวอร์ การคำนวณจาก Resource Usage แล้วนำมาสร้างเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้วัดการใช้พลังงาน แต่วิธีเหล่านั้นล้วนแต่สามารถใช้พยากรณ์การใช้พลังงานเท่านั้น ไม่ใช่ค่าที่สามารถวัดได้จากการใช้งานจริง ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมและใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดการใช้พลังงานในเซิร์ฟเวอร์เสมือนจึงยังคงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า (Watt Meter) ในการวัดค่าพลังงานที่ใช้ไปในภาพรวมของการทำงานทั้งระบบ ซึ่งสามารถทำได้สะดวกและแม่นยำเนื่องจากค่าที่วัดได้นั้นเป็นค่าการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นจริงของเซิร์ฟเวอร์ในขณะนั้น [5]

3. กระบวนการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีวิธีการจองหน่วยความจำแตกต่างกันคือ แบบคงที่และแบบไดนามิค เพื่อผลการทดลองที่แม่นยำในการวัดค่าพลังงาน จึงจำเป็นต้องคุมสภาวะการทำงานต่างๆ ให้เหมือนกันกล่าวคือต้องทำการทดลองและวัดพลังงานจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาทดสอบในชุดเดียวกัน เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เครื่องคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องที่นำมาทดสอบการใช้พลังงาน แม้จะมีคุณสมบัติเดียวกันแต่การใช้พลังงานนั้นจะต่างกัน [15] และการทดลองจะกำหนดการใช้ทรัพยากรหน่วยความจำของเครื่องเซิร์ฟเวอร์ให้อยู่ในขอบเขตไม่เกิน 70% ของหน่วยความจำที่มี ซึ่งถือเป็นภาวะการใช้งานตามปกติที่เครื่องเซิร์ฟเวอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพที่สุด

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มการทดลอง แยกตามประเภทของภาระงานจำลองที่จะถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบ คือ กลุ่มการทดลองที่ 1 จะเป็นการวัดพลังงานที่เซิร์ฟเวอร์เสมือนใช้ในสถานการณ์ที่มีงานประเภท I/O- intensive ในแต่ละรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ (I/O Read Sequential, I/O Read Random, I/O Write Sequential, I/O Write Random) ทำงานอยู่และกลุ่มการทดลองที่ 2 จะเป็นการวัดพลังงานที่เซิร์ฟเวอร์เสมือนใช้ในสถานการณ์ที่ทำงานประเภท Memory-intensive ในทั้งสองการทดลอง จะมีการบันทึกปริมาณพลังงานที่ใช้ไปในเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีวิธีการจองหน่วยความจำทั้งแบบคงที่และแบบไดนามิค เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน โดยใช้ Plug Load Power Meter (Watts Up Power Meter) เป็นเครื่องมือในการวัดปริมาณพลังงานที่ใช้ไปในแต่ละการทดลอง และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาทำหน้าที่เป็นเครื่องเซิร์ฟเวอร์ใช้สำหรับทดลองจะมีคุณสมบัติต่างๆ ตามที่แสดงในตารางที่ 1 และภาพรวมการทดลองตามรูปที่ 1

การวัดค่าพลังงานในการทดลองนี้ จะวัดจากคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่จำลองเป็นเครื่องเซิร์ฟเวอร์ 1 เครื่อง ที่ได้รับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกมาโดยตรงจากแหล่งจ่ายไฟแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ความถี่ 50 Hz โดยมีอุปกรณ์วัดกำลังไฟฟ้าและบันทึกข้อมูล “Watts Up Power Meter” ติดตั้งอยู่เพื่อใช้ในการรายงานและบันทึก



รูปที่ 1 ภาพรวมของการทดลอง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเซิร์ฟเวอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Component	Detail
CPU	Intel Core i5 3470 @3.20 GHz
RAM	16 GB DDR3-1333
HDD	500 GB SATA3
Network	1 Gbps
OS	Windows Sewer 2012 R2
Virtual Machine	Microsoft Hyper V3

การใช้พลังงานไฟฟ้าของเซิร์ฟเวอร์ที่ใช้ทำการทดลองทุกๆ 1 วินาที

เซิร์ฟเวอร์เสมือนที่ใช้สำหรับทดลองนั้น จะถูกปรับตั้งให้ให้ใช้ซีพียูเสมือน 1 แกน ที่ความถี่สัญญาณนาฬิกา (Frequency Clock) 3.2 GHz อิมเมจ (Image) ของเซิร์ฟเวอร์เสมือนมีขนาดคงที่ 60 GB ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows Server 2012 R2 เป็นระบบปฏิบัติการของเซิร์ฟเวอร์เสมือน และติดตั้งโปรแกรม TestLimit64 และ SQLIO เป็นเครื่องมือ ในการทดลองลงไปในอิมเมจด้วย ซึ่งการทดลองในงานวิจัยนี้ จะใช้อิมเมจของเซิร์ฟเวอร์เสมือนเพียงชุดเดียวเท่านั้นเพื่อควบคุมสภาวะการทำงานของเซิร์ฟเวอร์เสมือนในแต่ละการทดลองให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะมีวิธีการจองหน่วยความจำที่แตกต่างกัน ซึ่งการปรับตั้งค่าต่างๆ ในการจองหน่วยความจำในเซิร์ฟเวอร์เสมือนทั้งสองแบบ สรุปไว้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปการปรับตั้งค่าต่างๆ ในการจองหน่วยความจำในเซิร์ฟเวอร์เสมือนแต่ละแบบ

Memory Configuration	Fix Memory Allocation VM	Dynamic Memory Allocation VM
Dynamic Memory Enable	×	✓
Startup RAM	8192 MB	512 MB
Minimum RAM	-	512 MB
Maximum RANI	-	8192 MB

ในกลุ่มการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นการทดลองวัดการใช้พลังงานบนเซิร์ฟเวอร์เสมือนในสถานการณ์ที่มีภาระงานประเภท I/O-intensive ทำงานอยู่ จะใช้แอปพลิเคชัน SQLIO ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันสำหรับจำลองภาระงานประเภท I/O-intensive บนพื้นฐานการทำงานของ Microsoft SQL Server เป็นเครื่องมือในการทดลอง และถูกติดตั้งลงในอิมเมจของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จะทำการทดลอง ในการทดลองจะมีการจำลองสถานการณ์การใช้ I/O ในรูปแบบต่างๆ 4 รูปแบบดังนี้

- I/O Read Sequential
- I/O Read Random
- I/O Write Sequential
- I/O Write Random

สำหรับการจำลองสถานการณ์การใช้ I/O แบบอ่านหรือเขียนแบบเรียงต่อเนื่อง (Sequential) นั้น จะถูกกำหนดให้มีการใช้จำนวน I/O ต่อรอบการทำงานคงที่ 256 I/O และการจำลองสถานการณ์การใช้ I/O แบบอ่านหรือเขียนแบบสุ่ม (Random) จะมีการใช้จำนวน I/O ต่อรอบการทำงานแบบสุ่มขนาดต่างกันไปในแต่ละรอบการทำงาน โดยการจำลองสถานการณ์การใช้ I/O นี้จะใช้เวลาในการทดลอง 5 นาทีเท่ากันทั้ง 4 รูปแบบการใช้ I/O

กลุ่มการทดลองที่ 2 จะทำการทดลองวัดการใช้พลังงานบนเซิร์ฟเวอร์เสมือน ในสถานการณ์ที่มีภาระงาน

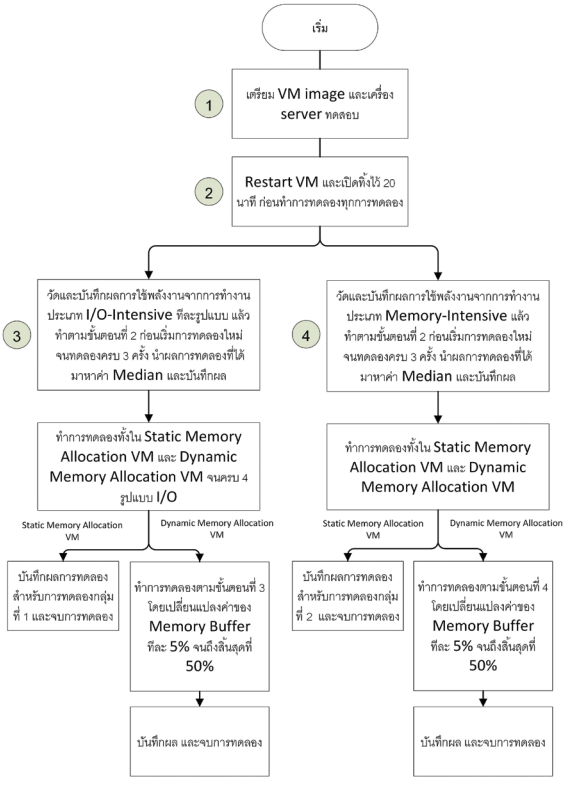
ประเภท Memory-intensive ทำงานอยู่โดยใช้แอปพลิเคชัน TestLimit64 เป็นเครื่องมือในการจำลองภาระงาน โดยจะมีการจำลองการให้ใช้หน่วยความจำเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องครั้งละ 100 MB ทุก ๆ 10 วินาที จนครบ 5120 MB ซึ่งจะใช้เวลาในการทดลอง 5 นาที เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1

ในแต่ละกลุ่มการทดลองจะแบ่งเป็นสองตอนคือ ตอนที่ 1 จะทดลองกับเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบคงที่ และตอนที่ 2 จะทดลองกับเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิค เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละตอนก่อนจะทำการทดลองซ้ำหรือเริ่มการทดลองใด ๆ ต่อไป จะต้องปิดการทำงานของเซิร์ฟเวอร์เสมือนและตั้งวิธีการจองหน่วยความจำของเซิร์ฟเวอร์เสมือนใหม่ ทั้งนี้เพื่อกำจัดปัจจัยรบกวนต่าง ๆ ที่อาจส่งผลให้การวัดค่าพลังงานที่ใช้ไปในการทดลองไม่แม่นยำ เมื่อทำการทดลองเสร็จในแต่ละการทดลองกับภาระงานในรูปแบบต่าง ๆ จะนำผลการใช้พลังงานที่บันทึกได้มาหาค่าเฉลี่ย (Mean) จากนั้นจะทำการทดลองซ้ำ รูปแบบภาระงานละ 3 ครั้ง และนำค่าเฉลี่ยของผลการทดลองแต่ละครั้งนั้น มาหาค่ามัธยฐาน (Median) เพื่อคัดเอาผลการทดลองที่แน่นอนที่สุดมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งวิธีการวัดค่าพลังงานนี้เป็นไปตามวิธีของ SPEC [16] ขั้นตอนทดลองเป็นไปตามรูปที่ 2

จากนั้นทำการทดลองซ้ำในส่วนของเซิร์ฟเวอร์เสมือน ที่มีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคทั้งหมด โดยเปลี่ยนแปลงค่า Memory Buffer ซึ่งเป็นค่าการจองหน่วยความจำเผื่อใช้งานของเซิร์ฟเวอร์เสมือนและมีใช้เฉพาะในระบบการจองหน่วยความจำแบบไดนามิค โดยค่า Memory Buffer ที่จะใช้ในการทดลองนั้น จะอยู่ในช่วง 5–50% เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า Memory Buffer กับการใช้พลังงานในเซิร์ฟเวอร์เสมือน

4. ผลการทดลอง

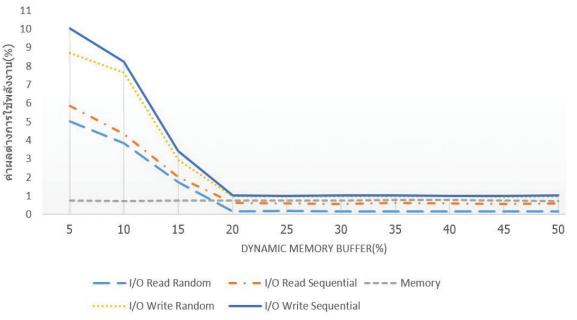
เมื่อนำข้อมูลการใช้พลังงานที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันพบว่า เซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคนั้น จะมีการใช้พลังงานในการทำงานมากกว่าเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบคงที่ในทุกประเภทงาน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งเอาไว้ และเมื่อนำผลการวัดค่าพลังงานของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่ได้จากทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า Memory Buffer ของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคมาเทียบกับเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบคงที่ พบความสัมพันธ์ดังแสดงตามรูปที่ 3



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำการทดลอง

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Memory Buffer ซึ่งเป็นค่าปริมาณหน่วยความจำที่ถูกจองเผื่อใช้งานในเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคนั้น มีความสัมพันธ์กับค่า Memory Pressure ดังแสดงตามรูปที่ 4

สำหรับค่า Average Memory Pressure นี้คือค่าโดยเฉลี่ยของร้อยละของความกดดันในหน่วยความจำของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิค



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Memory Buffer กับการใช้พลังงานในเซิร์ฟเวอร์เสมือน

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Memory Buffer และค่า Memory Pressure

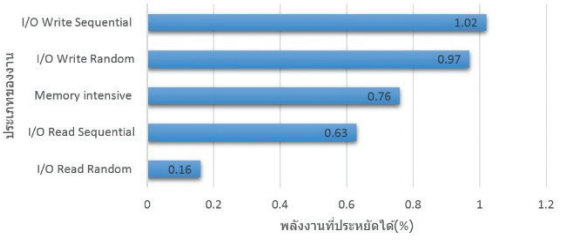
ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหลักการของ Dynamic Memory เมื่อเซิร์ฟเวอร์เสมือนมีค่า Memory Pressure สูงขึ้นมากถึงจุดๆ หนึ่ง Hypervisor จะจัดสรรหน่วยความจำที่เซิร์ฟเวอร์เสมือนนั้นต้องใช้มาให้ ดังนั้นหากค่า Average Memory Pressure นี้มีค่าสูงมากขึ้นนั้นหมายถึงเซิร์ฟเวอร์เสมือนนั้นมีการเกิดการ Memory Reallocation ที่มากขึ้นด้วย [5] และนั่นส่งผลให้เกิดการใช้ทรัพยากรของระบบที่มากขึ้นก่อให้เกิดการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นตามมา

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 และ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า Memory Buffer ของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่า Average Memory Pressure ของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่กำลังทำงานประเภท I/O-intensive ทุกรูปแบบนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องจนเริ่มคงที่เมื่อค่า Memory Buffer 20% เป็นต้นไป และส่งผลทำให้ผลต่างของการใช้พลังงานระหว่างเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคและแบบคงที่กำลังทำงานประเภท I/O-intensive ทุกรูปแบบนั้นลดลงจาก 5–10% เหลือ 0.63–1.02%

สำหรับงานประเภท Memory-intensive นั้นแตกต่างออกไป กล่าวคือค่า Average Memory Pressure ของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่กำลังทำงานประเภท Memory-intensive นั้น จะไม่ลดลงตามค่า Memory Buffer ที่เพิ่มขึ้น แต่จะคงที่ต่อเนื่องแม้จะผ่านค่า Memory Buffer ที่ 20% ไปแล้ว และส่งผลสอดคล้องกับค่าผลต่างของการใช้พลังงานระหว่างเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคและแบบคงที่กำลังทำงานประเภท Memory-intensive ที่มีความคงที่ไปอย่างต่อเนื่องอีกด้วย

ที่เป็นเช่นนี้จากการศึกษาและทดลองพบว่า เป็นเพราะอุปนิสัยการใช้งานหน่วยความจำ (Memory Consumption Characteristic) ของแอปพลิเคชันทั้งสองแบบนั้นมีความแตกต่างกัน [5] คือ งานประเภท I/O-intensive นั้นจะมีการใช้หน่วยความจำที่ไม่มีรูปแบบความคงที่แน่นอน มีการใช้ปริมาณหน่วยความจำสูงมากในบางช่วงเป็นระยะเวลาที่สั้นมากๆ ก่อนจะลดปริมาณการใช้หน่วยความจำลงอย่างรวดเร็วแบบไม่แน่นอนสลับกันไปมา เช่นนี้จึงส่งผลทำให้ค่า Average Memory Pressure ของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคซึ่งกำลังทำงานประเภท I/O-intensive นั้นมีค่าสูง แต่สามารถลดลงได้เมื่อมีการปรับค่า Memory Buffer ให้มากขึ้น และส่งผลให้ใช้พลังงานลดลงด้วย แตกต่างกับงานประเภท Memory-intensive ที่มีอุปนิสัยการใช้หน่วยความจำแบบ ใช้งานปริมาณมากแต่มีความผันแปรต่ำ [5] ด้วยความที่มีการผันแปรของการใช้หน่วยความจำที่ต่ำนี้ ทำให้ค่า Average Memory Pressure นั้นมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับทำงานประเภท I/O-intensive ส่งผลให้แอปพลิเคชันประเภท Memory-intensive นี้ ใช้พลังงานน้อยกว่าด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้ จุดเหมาะสมของค่า Memory Buffer นั้นจะอยู่ที่ 20% ซึ่งเป็นจุดที่ผลต่างของการใช้



รูปที่ 5 สรุปการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในการทำงานกับภาระงานต่าง ๆ เมื่อใช้วิธีการจองหน่วยความจำแบบคงที่

พลังงานระหว่างเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคและแบบคงที่ต่ำที่สุด และคงที่ไปอย่างต่อเนื่องจะนำมาพิจารณาเป็นข้อสรุปสำหรับค่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้หากใช้การจองหน่วยความจำแบบคงที่แทนการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 5

5. สรุป

แนวคิดของการจองหน่วยความจำให้เซิร์ฟเวอร์เสมือนแบบไดนามิคนั้นถูกนำมาใช้ ในระบบเซิร์ฟเวอร์เสมือน Microsoft Hyper-V มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการจัดการหน่วยความจำของระบบเซิร์ฟเวอร์เสมือน ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรหน่วยความจำบนเครื่องเซิร์ฟเวอร์อย่างคุ้มค่ามากกว่าวิธีการจองหน่วยความจำแบบคงที่มีมาแต่เดิม ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ซึ่งได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำทั้งแบบคงที่และแบบไดนามิคที่มีแอปพลิเคชันประเภท I/O-intensive และ Memory-intensive ทำงานอยู่แสดงให้เห็นว่าวิธีการจองหน่วยความแบบไดนามิคแม้จะช่วยให้เกิดการใช้ทรัพยากรหน่วยความจำบนเครื่องเซิร์ฟเวอร์อย่างคุ้มค่า แต่ก็ไม่ใช่วิธีการจองหน่วยความจำที่ช่วยประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับการจองหน่วยความจำแบบคงที่ จากการทดลองพบว่าวิธีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคนั้นจะมีการใช้ทรัพยากรส่วนเกินในการทำงาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในการทำงานที่มากขึ้นของเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคด้วย

โดยลำพังระบบการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคนั้น ในการทำงานประเภทเดียวกันจะมีการใช้พลังงานส่วนเกินในการทำงานเมื่อเทียบกับเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่มีการจองหน่วยความจำแบบคงที่อยู่ที่ 5–10% แต่ด้วยการปรับค่า Memory Buffer ที่เหมาะสม (สำหรับการทดลองนี้จะอยู่ที่ 20% ขึ้นไป) นั้นจะช่วยให้การใช้พลังงานส่วนเกินนั้นลดลงมาเหลือ 0.16–1.02% ยกเว้นงานประเภท Memory-intensive ซึ่งค่า Memory Buffer นั้นไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ต่อการใช้พลังงานส่วนเกิน

ค่า Memory Buffer นั้นเป็นค่าที่มาช่วยเสริมให้ระบบ Dynamic Memory ของ Hyper-V นั้นสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพขึ้น โดยการนำหลักของการจองหน่วยความจำเกินเผื่อใช้งาน ซึ่งเป็นแนวคิดที่มาจากระบบการจองหน่วยความจำแบบคงที่ ซึ่งค่า Memory Buffer นี้ยิ่งมีค่ามากเท่าไหร่ยิ่งทำให้ความเป็นการจองหน่วยความแบบไดนามิคเข้าใกล้ความเป็นการจองหน่วยความจำแบบคงที่มากเท่านั้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในระบบ Dynamic Memory นั้น เมื่อมีการทำ Memory Reallocation ที่บ่อยครั้งจะส่งผลให้เกิดการลดทอนของประสิทธิภาพในการทำงานลง [4] อีกทั้งยังทำให้เกิดการใช้พลังงานที่มากขึ้นด้วย ค่า Memory Buffer ที่เหมาะสมนั้นจะช่วยให้เกิดการทำ Memory Reallocation ลดลงได้ แต่หากค่านี้มากเกินไป นอกจากจะไม่ช่วยให้ประหยัดพลังงานมากขึ้นแล้ว ก็ยังจะเป็นการใช้หน่วยความจำที่สิ้นเปลืองมากเกินไปอีกด้วย ดังเช่นที่เห็นจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้หากเราใช้วิธีการจองหน่วยความแบบไดนามิคกับงานประเภท I/O-intensive โดยไม่ทราบถึงค่า Memory Buffer ที่เหมาะสมแล้วจะส่งผลให้เกิดการกินพลังงานมากกว่าที่ควรจะเป็น

เมื่อพิจารณาในจุดที่ผลต่างของการใช้พลังงานระหว่างเซิร์ฟเวอร์เสมือนที่จองหน่วยความจำแบบไดนามิคและแบบคงที่ต่ำที่สุด (Memory Buffer 20%) จะเห็นว่าหากใช้วิธีการจองหน่วยความจำแบบคงที่แทนการใช้

หน่วยความแบบไดนามิคจะสามารถประหยัดพลังงานได้ 0.16–1.02% แม้ดูเหมือนเป็นปริมาณที่น้อยแต่สำหรับเครื่องเซิร์ฟเวอร์ขนาดเล็ก ที่มีการใช้พลังงานประมาณ 500 W ก็สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 5 W ซึ่งเทียบได้กับปริมาณการใช้พลังงานของหลอดไฟส่องสว่างแบบ LED 1 หลอดที่ให้ความสว่างได้ตลอดการทำงาน ของแอปพลิเคชันที่ทำงานบนเครื่องเซิร์ฟเวอร์เครื่องนั้น ยิ่งความนิยมในตัว Microsoft Hyper-V ที่มีมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน [1] ผลกระทบของการใช้พลังงานที่ดูเหมือนจะเล็กน้อยนี้จะยิ่งส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานได้มากขึ้นในภาพรวม

ถ้าหากมีความจำเป็นต้องใช้การจองหน่วยความจำแบบไดนามิคกับแอปพลิเคชันต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ แอปพลิเคชันประเภท Memory- intensive นี้จะเหมาะสมกับการใช้การจองหน่วยความจำแบบไดนามิคที่สุด เนื่องจากวิธีการจองหน่วยความจำแบบไดนามิคนั้นจะส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานกับแอปพลิเคชันประเภท Memory- intensive น้อยมากแม้จะไม่ทราบค่า Memory Buffer ที่เหมาะสมก็ตาม ส่วนแอปพลิเคชันประเภท I/O-intensive นั้น หากจำเป็นต้องใช้การจองหน่วยความจำแบบไดนามิค ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า สมควรตั้งค่า Memory Buffer ที่ 20% ขึ้นไป จึงจะสามารถลดการใช้พลังงานส่วนเกินในการทำงาน ทำให้ใช้พลังงานได้ใกล้เคียงกับการจองหน่วยความจำแบบคงที่มากที่สุด อีกทั้งค่า Memory Buffer ที่ 20% นี้ ยังเป็นปริมาณค่า Memory Buffer ที่ส่งผลลดทอนประสิทธิภาพการทำงานของเซิร์ฟเวอร์น้อยที่สุดด้วย [12]

เอกสารอ้างอิง

[1] T. J. Bittman, P. Dawson, and M. Warrilow. (2016, Aug.). Magic Quadrant for x86 Server Virtualization Infrastructure. Gartner Inc., CT. [Online]. Available: https://www.gartner.com

[2] H. Fayyad-Kazan, L. Perneel, and M. Timmerman, "Benchmarking the performance of Microsoft Hyper-V server, VMware ESXi and Xen Hypervisors," *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 4, no. 12, pp. 922–933, December 2013.

[3] O. Thomas, *Training Guide: Administering Windows Server 2012 R2*, Redmond, WA: Microsoft Press, 2014.

[4] A. Finn, P. Lownds, M. Luescher, and D. Flynn, *Windows Server 2012 Hyper-V Installation and Configuration Guide*, Indianapolis, IN: John Wiley & Sons Inc., 2013.

[5] J. W. Smith and I. Sommerville, "Workload classification & software energy measurement for efficient scheduling on private cloud platforms," presented at the ACM SOCC, Cascais, Portugal, October 26–28, 2011.

[6] VMware, "Understanding full virtualization paravirtualization, and hardware assist," VMware Inc., Palo Alto, CA, Tech. Rep. WP-028-PRD-01-01, March 2008.

[7] J. O. Iglesias, P. Perry, L. Murphy, T. S. Buda, and J. Thorburn, "An experimental methodology to evaluate energy efficiency and performance in an enterprise virtualized environment," in *Proceedings ICPE*, 2014, pp. 51–62.

[8] B. Posri and B. Papasratorn, "Cloud computing resources provisioning using virtual server size expansion method," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok,* vol. 23, no. 1, pp. 180–187, 2013 (in Thai).

[9] A. Desai, R. Oza, P. Sharma, and B. Patel, "Hypervisor: A survey on concepts and taxonomy," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 222–225, 2013.

[10] V. Malik and C. R. Barde, "Survey on architecture of leading hypervisors and their live migration techniques," *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 3, no. 11, pp. 65–72, 2014.

[11] Microsoft. (2010 July 12). Hyper-V Dynamic Memory Configuration Guide. [Online]. Available: http://technet.microsoft.com/en-us/library

[12] M. Tulloch, *Training Guide: Installing and Configuring Windows Server 2012*, Redmond, WA: Microsoft Press, 2012.

[13] Microsoft. (2012). *Windows Server 2012: Server Virtualization*. [Online]. Available: http://download.microsoft.com/documents/italy/SBP/server2012/

[14] A. Kansal, F. Zhao, J. Liu, N. Kothari, and A. A. Bhattacharya, "Virtual machine power metering and provisioning," presented at the ACM SOCC, Indianapolis, IN, USA, June 10, 2010.

[15] X. Zhang, J. Lu, and X. Qin, "Energy consumption characteriation of heterogeneous servers," in *ChinaGrid Annual Conference*, 2013, pp. 14–21.

[16] SPEC. (2006). *SPEC CPU2006 Run and Reporting Rules*. [Online]. Available: http://www.spec.org/cpu2006/Docs/runrules.html