

# การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนแรกของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

ประยูร สงศิริฤทธิกุล<sup>1,2\*</sup>, ปณิษฐา สมบุญชู<sup>1</sup>, สุวัฒน์ กลิ่นเขียว<sup>1</sup>, เสกสรร ถึงกลาง<sup>1</sup>, วีระพงษ์ แพสุวรรณ<sup>1,3</sup>, ทาเกฮิโก อิชิอิ<sup>1,4</sup>, อาคิโตะ คากิซากิ<sup>5</sup>

Songsiriritthigul, P.<sup>1,2\*</sup>, Sombunchoo, P.<sup>1</sup>, Klinkhien, S.<sup>1</sup>, Thungklang, S.<sup>1</sup>, Pairsuwan, W.<sup>1,3</sup>, Ishii, T.<sup>1,4</sup> and Kakizaki, A.<sup>1,5</sup> (2001). Evaluation of the Performance of the First Beamline for the Siam Photon Source. *Suranaree J. Sci. Technol.* 8:189-195.

## Abstract

The performance of the first beamline for the Siam Photon Source has been evaluated by using a computer ray tracing program. The effects of collecting power of the gratings on the energy resolution of the beamline have been studied. Optical aberrations increase with the increasing collecting power and this results in the reduction of the resolution. It is found that monochromatized light with an energy resolution of  $2 \times 10^{-4}$  and with a photon flux sufficient for photoemission experiments can be obtained from this beamline.

Keywords : Beamline, monochromator, vacuum ultraviolet, soft x-rays, ray tracing

## บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนแรกของเครื่องกำเนิดแสงสยามได้ถูกประเมินโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการศึกษาผลกระทบของขนาดของพื้นที่ที่แสงตกกระทบบนเกรตติงเดี่ยวบนต่อความสามารถในการแยกแยะพลังงาน พบว่าการที่พื้นที่ดังกล่าวมีบริเวณเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความบิดเบี้ยวของภาพมีมากขึ้นตาม ส่งผลให้ความสามารถในการแยกแยะพลังงานลดลง จากการศึกษาพบว่าแสงที่ถูกคัดเลือกพลังงานแล้วและมีความสามารถในการแยกแยะพลังงานเท่ากับ  $2 \times 10^{-4}$  มีความเข้มเพียงพอสำหรับการทดลองทางคานโฟโตอิมิชัน

<sup>1</sup> ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

<sup>2</sup> Ph.D., อาจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>3</sup> Ph.D., รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>4</sup> Ph.D., ศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>5</sup> Ph.D., ศาสตราจารย์ Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, Ibaraki 305-0801, Japan.

\* ผู้เขียนที่โหมการติดต่อ

## บทนำ

การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนโดยอาศัยการคำนวณโดยตรงจากฟังก์ชันเส้นทางเดินของแสง (optical path function) มีปัจจัยหลักสามประการที่ทำให้ความยุ่งยากเป็นอย่างมากได้แก่ (1) แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนมีขนาดที่ไม่เป็นศูนย์ (2) แสงที่ปลดปล่อยออกมาจากแต่ละตำแหน่งภายในบริเวณของแหล่งกำเนิดแสงมีปริมาณความเข้มที่แตกต่างกัน และ (3) แสงที่ปล่อยออกมามีทิศทางแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนมีความจำเป็นที่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์จริงโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า Monte Carlo Method ในการทำการจำลองดังกล่าวเป็นการทำ Ray tracing นั่นคือการติดตามเส้นทางเดินของแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังตำแหน่งที่ต้องการนำแสงซินโครตรอนไปใช้ประโยชน์ ทำให้เราทราบคุณลักษณะของแสงที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ยิ่งต่อการพัฒนาระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน ในปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทำ Ray tracing หลายโปรแกรม แต่มีอยู่สองโปรแกรมที่มีการยอมรับและนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยเกี่ยวกับแสงซินโครตรอนหลายแห่ง โปรแกรมดังกล่าวคือ RAY (Schaeffers, 1996) และ SHADOW (Lai and Cerrina, 1986)

บทความนี้เป็นการรายงานผลการศึกษาและประเมินระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนแรกของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ระบบลำเลียงแสงดังกล่าวได้ถูกออกแบบโดยพิจารณาฟังก์ชันเส้นทางเดินของแสงโดยมีรายละเอียดแสดงในบทความที่นำเสนอพร้อมกันในวารสารฉบับนี้ (ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล และคณะ, 2544)

## Ray tracing

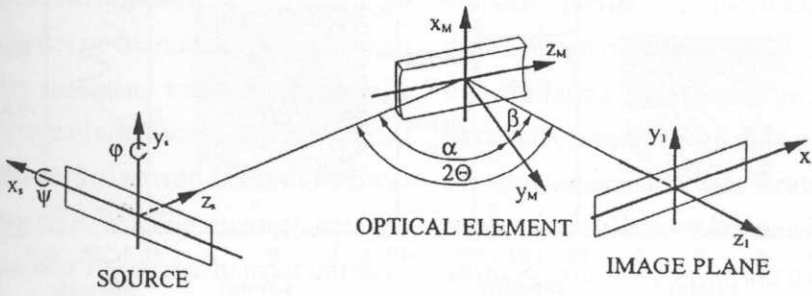
โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาและประเมินระบบลำเลียง

แสงซินโครตรอนในงานนี้คือโปรแกรม RAY version 24.1 ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ OpenVMS version 7.1 บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ALPHA server 4100 โปรแกรม RAY ดังกล่าวสามารถจำลองการทำงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน และทำให้ได้มาซึ่งคุณลักษณะต่าง ๆ ของแสง (เช่น ขนาดการกระจายของความเข้ม การกระจายของค่าพลังงานของแสง เป็นต้น) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบลำเลียงแสง ในการจำลองการทำงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนเริ่มต้นจากชุดของรังสีของแสงจะถูกกำหนดขึ้นอย่างสุ่มจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม หลังจากนั้นเป็นการติดตามรังสีของแสงเมื่อแสงตกกระทบหรือผ่านระบบของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น กระจก (Mirror), slits และ เกรตติ้งเลี้ยวเบน (Diffraction grating) โดยอาศัยกฎต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ของแสง จนกระทั่งมีการเกิดภาพบนระนาบของภาพ (Image plane) ณ ตำแหน่งที่สนใจ

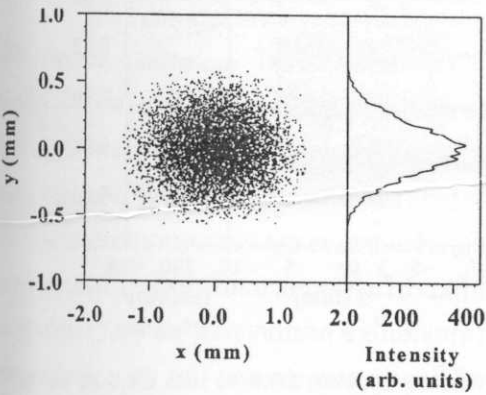
รูปที่ 1 แสดงระบบพิกัดและมุมต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาและประเมินระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนนี้ ส่วนคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดของแสงซินโครตรอนถูกกำหนดโดยคุณลักษณะของลำอิเล็กตรอนบริเวณที่แสงซินโครตรอนถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ภายใน bending magnet ของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน รายละเอียดของคุณลักษณะของลำอิเล็กตรอนบริเวณดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 สำหรับรายละเอียดของระบบแสงซินโครตรอนที่ศึกษาในงานนี้แสดงในบทความที่นำเสนอพร้อมกันในวารสารฉบับนี้ (ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล และคณะ, 2544)

## ผลและการอภิปราย

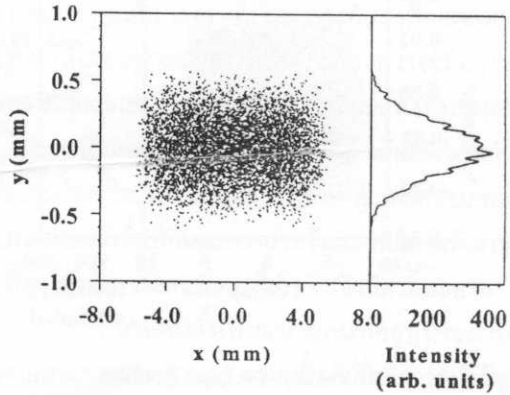
รูปที่ 2 ถึงรูปที่ 4 แสดงภาพตัดขวางของลำแสงและ



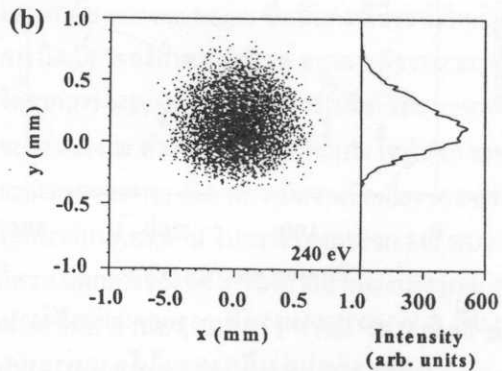
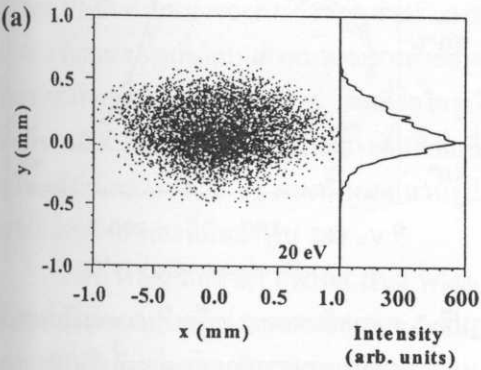
รูปที่ 1. ระบบพิกัดและมุมต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำการ Simulations



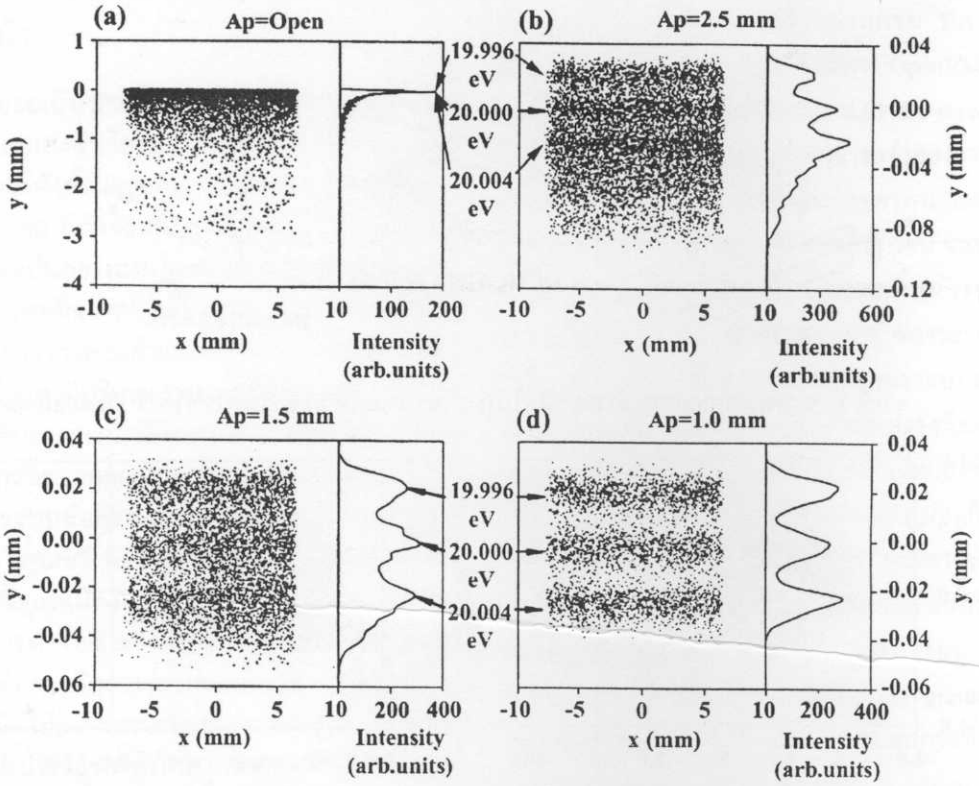
รูปที่ 2. ภาพแสดงแหล่งกำเนิดของแสงซินโครตรอน ที่ได้จากการ simulation



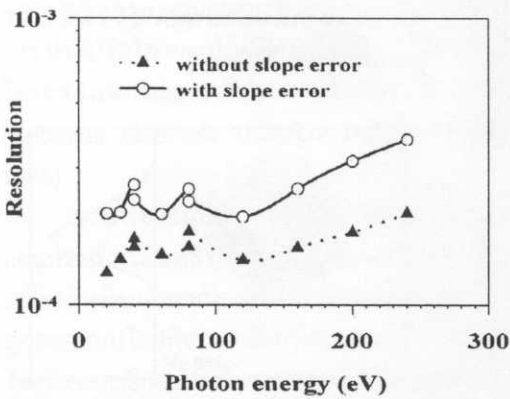
รูปที่ 3. ภาพที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของ entrance slit หลังจากที่ได้แสงจากแหล่งกำเนิดตกกระทบบนกระจก MO



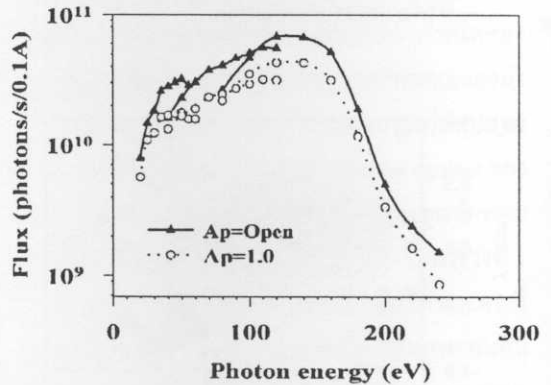
รูปที่ 4. ภาพที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของสารตัวอย่างหลังจากที่ได้แสงจากแหล่งกำเนิดที่มีพลังงาน (a) 20 eV และ (b) 240 eV ตกกระทบบนกระจก M2



รูปที่ 5. ภาพที่เกิดขึ้นและ Line profiles ของแสงที่มีพลังงาน 19.996, 20.000 และ 20.004 eV ณ ตำแหน่งของ exit slit สำหรับขนาดของช่องเปิดของ Aperture ที่ต่างกัน



รูปที่ 6. ค่าความสามารถในการแยกแยะพลังงานของระบบลำเลียงแสงได้จากการทำ simulations เมื่อไม่มีการพิจารณาและมีการพิจารณาผลของ slope error ของกระจกและเกรตติง



รูปที่ 7. ความเข้มของแสงหรือปริมาณของโฟตอนที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างต่อหนึ่งวินาที

การกระจายความเข้มของแสงในแนวแกนตั้ง (line profile) ของแสงซินโครตรอนที่มีพลังงานเท่ากับ 20 eV ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบลำแสงซินโครตรอนที่ได้จากการ simulations ความหนาแน่นของจุดในภาพตัดขวางของลำแสงนั้นแสดงถึงความหนาแน่นของรังสีของแสงซินโครตรอน บริเวณที่มีความหนาแน่นมากหมายถึงบริเวณที่มีความเข้มสูง ส่วน line profile นั้นแสดงความถี่ของรังสีในแนวแกนตั้ง ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะการกระจายของความเข้มในแนวแกนตั้ง

รูปที่ 2 แสดงแหล่งกำเนิดของแสงซินโครตรอนที่ได้จากการ simulations โดยใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของลำอิเล็กตรอนจากตารางที่ 1 การกระจายของความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมานั้นมีลักษณะเป็นแบบ Gaussian รังสีของแสงซินโครตรอนจากแหล่งกำเนิดเมื่อตกกระทบกระจก M0 จะสะท้อนในแนวแกนนอนและถูกโฟกัสในแนวแกนตั้งให้ไปรวมกัน ณ ตำแหน่ง 7300 มม. ห่างจากกระจก ซึ่งเป็นตำแหน่งของ entrance slit ของ monochromator ภาพที่เกิดขึ้นและลักษณะของ line profile ณ ตำแหน่งดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3 กระจก M2 ทำหน้าที่สะท้อนแสงในแนวแกนตั้งและโฟกัสรังสีของแสงที่ผ่าน monochromator ไปรวมกันที่ระยะทาง 1600 มม. ห่างจากกระจก M2 ซึ่งเป็นตำแหน่งของสารตัวอย่างสำหรับการทดลอง ลักษณะภาพที่เกิดขึ้นผิวหน้าของสารตัวอย่างที่จะทำการทดลองแสดงในรูปที่ 4 ภาพที่ได้ในรูป 4a เป็นกรณีที่ slits ต่าง ๆ ถูกเปิดให้กว้างเต็มที่เพื่อที่จะให้แสงที่มีพลังงาน 20 eV ผ่านทั้งหมด ส่วนรูป 4b เป็นกรณีของแสงที่มีพลังงาน 240 eV

ตารางที่ 2 แสดงค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) ของการกระจายของความเข้มของแสงที่มีพลังงาน 20 และ 240 eV ในแนวแกนนอนและในแนวแกนตั้ง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบลำแสงซินโครตรอนที่ได้จากการ simulations ปริมาณดังกล่าวบ่งบอกถึงขนาดของลำแสง เมื่อพิจารณาเฉพาะ

อัตราขยายของขนาดลำแสงในแนวแกนนอนหรือสัดส่วนของค่า FWHM ของลำแสงในแนวแกนนอน ณ ตำแหน่งที่วางสารตัวอย่างต่อขนาด ณ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ในการออกแบบค่าอัตราส่วนดังกล่าวสำหรับระบบลำแสงซินโครตรอนนี้คือ 0.40 จากการทำการ simulations โดยให้ slits ทั้งหมดเปิดกว้างให้แสงทั้งหมดผ่านไปได้ พบว่าอัตราขยายดังกล่าวสำหรับแสงที่มีพลังงาน 20 eV มีค่าเท่ากับ 0.68 ซึ่งแตกต่างเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ สำหรับแสงที่มีพลังงาน 240 eV นั้นอัตราขยายในแนวแกนนอนมีค่าเท่ากับ 0.41 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ ทั้งนี้เนื่องจากว่าแสงที่มีพลังงานที่สูงกว่าจะมีความคมมากกว่าแสงที่มีพลังงานที่ต่ำกว่าเมื่อแสงทั้งสองค่าพลังงานถูกปลดปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 3 จึงส่งผลให้พื้นที่ที่แสงตกกระทบบนกระจกมีพื้นที่ที่น้อยกว่าสำหรับแสงที่มีค่าพลังงานที่สูง ดังนั้น aberrations ที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยตาม

แนวแกนตั้งเป็นแนวแกนที่อยู่บนระนาบของการกระจาย (Dispersion plane) ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อความสามารถในการแยกแยะพลังงานของระบบลำแสงซินโครตรอน จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายของกระจกทุกอันในแนวแกนนี้ได้ถูกออกแบบให้มีค่าเท่ากับ 1.0 โดยกำหนดให้ entrance arm length มีค่าเท่ากับ exit arm length ซึ่งเป็นกรณีที่จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของภาพน้อยที่สุด จากการพิจารณาผลที่ได้จากการ simulations โดยการเปรียบเทียบขนาดของลำแสง ณ ตำแหน่งที่มีการเกิดการโฟกัสของแต่ละกระจกจากตารางที่ 2 พบว่ามีความบิดเบี้ยวของภาพในแนวแกนตั้งเช่นกัน ในกรณีของกระจก M0 พบว่ามีความแตกต่างของขนาดของลำแสงเพียงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสาเหตุที่ค่า FWHM ของลำแสง ณ ตำแหน่ง exit slit มีค่าน้อยกว่าค่า FWHM ของลำแสง ณ ตำแหน่ง entrance slit เนื่องจากอำนาจของการโฟกัสของ varied line-spacing plane grating จากการเปรียบเทียบขนาดของลำแสง ณ ตำแหน่ง

ตารางที่ 1. รายละเอียดของคุณลักษณะของลำอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่งที่นำแสงซินโครตรอนมาใช้งาน

ขนาดของลำอิเล็กตรอนในแกนนอน, $\sigma_x$	0.465 มม.
ขนาดของลำอิเล็กตรอนในแกนตั้ง, $\sigma_y$	0.191 มม.
มุม divergence ในแกนนอน, $\sigma_x$	0.4470 มิลลิเรเดียน
มุม divergence ในแกนตั้ง, $\sigma_y$	0.0873 มิลลิเรเดียน

ตารางที่ 2. FWHM ของลำแสงซินโครตรอนในแนวแกนนอนและในแนวแกนตั้ง (ในหน่วยของ มิลลิเมตร) ซึ่งได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์

ตำแหน่งที่ตั้ง	แสงที่มีพลังงาน 20 eV		แสงที่มีพลังงาน 240 eV	
	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
แหล่งกำเนิดแสง	1.062	0.440	1.061	0.436
entrance slit	6.285	0.448	6.263	0.447
exit slit	10.184	0.181	10.198	0.055
สารตัวอย่าง	0.719	0.382	0.440	0.450

ตารางที่ 3. ค่ามุม  $\phi$  และ  $\psi$  ที่มีค่าน้อยที่สุดและที่มีค่ามากที่สุดของแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากการจำลอง สำหรับแสงที่มีพลังงาน 20 และ 240 eV

พลังงานของแสง (eV)	$\phi_{\min}$ (mrad)	$\phi_{\max}$ (mrad)	$\psi_{\min}$ (mrad)	$\psi_{\max}$ (mrad)
20	-2.500	2.500	-3.5186	3.6442
240	-2.500	2.500	-1.5882	1.6249

exit slit และตำแหน่งที่วางสารตัวอย่างจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระจก M2 ทำให้เกิดความบิดเบี้ยวของภาพเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากว่ากระจกดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งหลังจาก monochromator จึงไม่มีผลต่อความสามารถแยกแยะพลังงานของระบบลำแสงซินโครตรอน แต่อย่างไรก็ตามความบิดเบี้ยวของภาพดังกล่าวส่งผลต่อขนาดที่ใหญ่ขึ้นของลำแสง ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการสำหรับการทดลองทางด้าน Angle-resolved photoemission

ค่าความสามารถในการแยกแยะพลังงานของระบบลำแสงซินโครตรอนจะถูกกำหนดโดยความกว้างของช่องเปิดของ entrance slit และของ exit slit ถ้าขนาดช่องเปิดมีขนาดเล็กลงจะทำให้ความ

สามารถในการแยกแยะสูงขึ้น ในทางทฤษฎีค่าความสามารถในการแยกแยะที่กำหนดโดยขนาดช่องเปิดของ slits สามารถคำนวณได้เมื่อทราบความกว้างของช่องเปิดของ slits ตามความสัมพันธ์ดังที่ได้รายงานในบทความที่นำเสนอพร้อมกันในวารสารฉบับนี้ (ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล และคณะ, 2544) แต่ในความเป็นจริงคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดได้แก่ขนาดของแหล่งกำเนิดแสงและความคมของลำแสงที่ปลดปล่อยออกมาเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการแยกแยะพลังงานของระบบลำแสงซินโครตรอน ดังนั้นจึงมีการเพิ่ม Aperture ซึ่งวางอยู่ระหว่าง entrance slit และกระจก M1 ในกรณีที่มีความต้องการความสามารถในการแยกแยะที่สูง ขนาดช่องเปิด

ของ Aperture จะต้องมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงภาพตัวขวางของลำแสงและการกระจายความเข้มของแสงในแนวแกนตั้งของแสงที่มีพลังงานสามค่าพลังงานคือ 19.996, 20.000 และ 20.004 eV ณ ตำแหน่งของ exit slit สำหรับขนาดของช่องเปิดของ Aperture ที่ต่างกัน เมื่อมีการเปิด Aperture ให้แสงผ่านได้ทั้งหมดจะทำให้เราไม่สามารถแยกแยะแสงทั้งสามค่าพลังงานออกจากกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 5a ความสามารถในการแยกแยะพลังงานดียิ่งขึ้นเมื่อขนาดช่องเปิดมีขนาดยิ่งเล็กลง

ค่าความสามารถที่แสดงในรูปที่ 6 เป็นค่าที่ได้จากการ simulations เมื่อกำหนดให้ขนาดช่องเปิดของ entrance slit และ exit slit ของแต่ละค่าพลังงานของโฟตอนที่ทำให้ค่าความสามารถในการแยกแยะที่กำหนดโดยขนาดช่องเปิดของ slits ในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ  $2 \times 10^{-4}$  เมื่อไม่มีการพิจารณาและเมื่อมีการพิจารณาผลของ slope errors ของกระจกและเกรตติง จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการนำเอา slope error มาพิจารณาค้นพบว่าค่าความสามารถในการแยกแยะพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือความสามารถในการแยกแยะพลังงานของระบบลำเลียงแสงลดลง

นอกเหนือจากความสามารถในการแยกแยะของระบบลำเลียงแสง ในการทดลองทางคานโฟโตมิซันยังต้องการความเข้มของแสงที่เพียงพอที่จะทำให้ได้สเปกตรัมจากการวัดมีค่าทางสถิติที่ดี ปริมาณความเข้มของแสงหรือปริมาณโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษาต้องมีค่าน้อย 109 โฟตอนต่อหนึ่งวินาที ในรูปที่ 7 แสดงความเข้มของแสงหรือปริมาณของโฟตอนที่ตกกระทบสารตัวอย่างต่อหนึ่งวินาที โดยปริมาณดังกล่าวได้จากการทำการ simulations โดยกำหนดค่าความสามารถในการแยกแยะพลังงานของ monochromator ที่กำหนดโดยขนาดความกว้างของช่องเปิดของ entrance slit และ exit slit ที่มีค่าเท่ากับ  $2 \times 10^{-4}$  จากการศึกษพบว่าปริมาณความเข้มของแสง

ที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างมีปริมาณเพียงพอสำหรับการทดลองทางคานโฟโตมิซัน

## สรุป

จากการประเมินระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนโดย การทำการจำลองสถานการณ์จริงโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ RAY พบว่าระบบลำเลียงแสงดังกล่าวสามารถที่จะลำเลียงแสงซินโครตรอนจากเครื่องกำเนิดแสงสยามมีพลังงานที่อยู่ในช่วง 20-240 eV โดยที่แสงที่ลำเลียงได้มี energy resolution และมีความเข้มเพียงพอสำหรับการทดลองทางคานโฟโตมิซัน

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ Dr. Franz Schaefers (BESSY) ที่อนุญาตให้ใช้โปรแกรม RAY ในงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- ประยูร สงศิริทธิกุล, วีระพงษ์ แพสุวรรณ, ทาเกชิโก อิชิอิ และ ฮาคิโต คากิซากิ (2544). การออกแบบระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนแรกของเครื่องกำเนิดแสงสยาม. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 2544: 123-130.
- B. Lai and F. Cerrina (1986). SHADOW - A Synchrotron Radiation Ray Tracing Program. Nucl. Instr. Meth. A 246: 337-341.
- F. Schaefers (1996). RAY: the BESSY Raytrace Program to Calculate Synchrotron Radiation Beamlines. Technischer Bericht, BESSY TB 202:1-37.
- P. Songsiriritthigul, P. Sombunchoo, B.N. Raja Sekhar, W. Pairsuwan, T. Ishii and A. Kakizaki. Comparison of Varied Line-spacing Plane Grating and Varied Line-spacing Spherical Grating Monochromators for the Siam Photon Source. Nucl. Instr. Meth. A (in press).