คุณลักษณะเชิงรังสีคณิตและอัตราผ่านค่าแกมมาของหัววัดรังสีรุ่นอาร์คเช็ค สำหรับการทวนสอบแผนรังสีรักษาเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่ง

Dosimetry characteristics and gamma passing rate of ArcCHECK for the verification of fixed gantry intensity modulated radiation therapy treatment planning

*สรธัญ ชาญจระเข้** *สมศักดิ์ วรรณวิไลรัตน์* *พิชญาภรณ์ กลั่นกลิ่น*

*Sorathan Chanjorakhae** *Somsak Wanwilairat* *Pitchayaponne Klunklin*

หน่วยรังสีรักษาและมะเร็งวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

Division of Therapeutic Radiology and Oncology, Faculty of Medicine, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

** ผู้รับผิดชอบบทความ (Email: mario_chumphae@hotmail.com)*

** Corresponding author (Email: mario_chumphae@hotmail.com)*

Received February 2017

Accepted as revised April 2017

Abstract

Background: Pre-treatment dosimetric verification for patient specific quality assurance has become an essential part of intensity modulated radiation therapy (IMRT).

Objectives: To evaluate dosimetry characteristics and gamma passing rate of ArcCHECK for fixed gantry IMRT treatment planning.

Materials and methods: ArcCHECK dosimetry characteristics evaluation includes dose linearity, short term reproducibility, and field size dependence. In this study, 20 head and neck cancer treatment plans and gamma index with 3%/3 mm and 10% threshold criteria were evaluated.

Results: The study showed that diode detectors of ArcCHECK have an excellent dose linearly response with a linear regression coefficient of 1 (R^2=1.0) and a short term reproducibility standard deviation ±0.04%. Field size dependent responses of diodes was identical to the response of ionization chamber. For KonRad treatment planning verification by ArcCHECK, average gamma passing rates for all 20 fixed gantry IMRT plans was 97.40% and calculated tolerance level was 94.77%.

Conclusion: ArcCHECK has good dosimetric characteristics and good efficiency for fixed gantry IMRT treatment planning verification.

Journal of Associated Medical Sciences 2017; 50(2): 300-306. Doi: 10.14456/jams.2017.30

Keywords: ArcCHECK, fixed gantry IMRT, gamma passing rates

บทคัดย่อ

ที่มาและความสำคัญ: การฉายรังสีเทคนิครังสีปรับความเข้มเป็นเทคนิคที่มีความซับซ้อน การทวนสอบแผนรังสีรักษาจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง

วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงรังสีคณิตของหัววัดและหาอัตราผ่านค่าแกมมาของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK ในการทวนสอบแผนรังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่ง

วัสดุและวิธีการศึกษา: ศึกษาคุณสมบัติเชิงรังสีคณิตของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK ได้แก่ การตอบสนองต่อปริมาณรังสีเชิงเส้น ความแม่นยำในการตอบสนองของหัววัดในระยะสั้น และผลของขนาดพื้นที่รังสีต่อการตอบสนองของหัววัด จากนั้นนำอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK ไปใช้ทวนสอบแผนรังสีรักษาของผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอจำนวน 20 แผน กำหนดเกณฑ์ค่าดัชนีแกมมาเท่ากับ 3%/3 มิลลิเมตร ค่าขีดจำกัดเท่ากับ 10%

ผลการศึกษา: หัววัดไดโอดของอุปกรณ์ ArcCHECK มีการตอบสนองต่อปริมาณรังสีเป็นเส้นตรงที่ดี (R^2=1.0) มีความแม่นยำในการตอบสนองต่อปริมาณรังสีในระยะสั้นที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ±0.04% การตอบสนองต่อขนาดของพื้นที่รังสีของหัววัดไดโอดให้ผลใกล้เคียงกับหัววัดรังสีชนิดประจุแตกตัว การทวนสอบแผนรังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่งจากเครื่องวางแผนรังสีรักษา KonRad พบว่าแผนรังสีรักษามีอัตราผ่านค่าแกมมาเฉลี่ยเท่ากับ 97.40 คำนวณค่า tolerance level ได้เท่ากับร้อยละ 94.77

สรุปผลการศึกษา: อุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK มีคุณสมบัติเชิงรังสีคณิตที่ดี มีความเหมาะสมในการใช้ทวนสอบแผนรังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่ง

Journal of Associated Medical Sciences 2560; 50(2): 300-306. Doi: 10.14456/jams.2017.30

คำสำคัญ: อุปกรณ์วัดรังสีรุ่นอาร์คเช็ค แผนรังสีรักษาเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่ง อัตราผ่านค่าแกมมา

บทนำ

เทคนิครังสีปรับความเข้มเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาให้สามารถปรับปริมาณรังสีให้ครอบคลุมบริเวณเป้าหมายได้มากขึ้น โดยที่เนื้อเยื่อปกติข้างเคียงบริเวณเป้าหมายยังคงได้รับรังสีปริมาณต่ำ[1] ขณะเดียวกัน การปรับความเข้มรังสีเป็นผลให้เทคนิคการฉายรังสีมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ก่อนนำแผนรังสีรักษาไปใช้กับผู้ป่วยจำเป็นต้องมีการทวนสอบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผู้ป่วยได้รับการฉายรังสีอย่างถูกต้องตามที่วางแผนรังสีรักษาไว้

การทวนสอบแผนรังสีรักษาเป็นขั้นตอนทวนสอบปริมาณรังสีก่อนฉายจริงกับผู้ป่วย วิธีที่นิยมคือการเปรียบเทียบตำแหน่งและการกระจายปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดเทียบกับการคำนวณ แบ่งการกระจายปริมาณรังสีออกเป็นบริเวณที่มีความแตกต่างของปริมาณรังสีสูง ซึ่งใช้ระยะห่างการกระจายรังสีที่สอดคล้อง (distance to agreement) หาได้จากระยะห่างระหว่างปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดและการคำนวณที่ระดับปริมาณรังสีเดียวกัน และในบริเวณที่มีความแตกต่างของปริมาณรังสีต่ำใช้ค่าความแตกต่างของปริมาณรังสี (dose difference) หาได้จากการเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีที่ตำแหน่งเดียวกันระหว่างการวัดและการคำนวณ การเปรียบเทียบที่ใช้ทั้ง dose difference และ distance to agreement เรียกว่าการเปรียบเทียบแบบใช้ค่าดัชนีแกมมา (gamma index)[2,3]

อุปกรณ์วัดรังสีที่ใช้ในการทวนสอบแผนรังสีรักษา มีลักษณะและรูปร่างของหัววัดแตกต่างกันตามรุ่นและบริษัทผู้ผลิต อุปกรณ์วัดรังสีที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้ สามารถวัดปริมาณรังสีได้ถูกต้องและแม่นยำ เมื่อวัดปริมาณรังสีซ้ำควรได้ค่าเดิม (reproducibility) การตอบสนองต่อปริมาณรังสีสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (linearity) สามารถวัดปริมาณรังสีได้ทุกระดับพลังงาน (energy independence) วัดรังสีได้ในทุกมุมที่หัวเครื่องฉายรังสีเคลื่อนที่ไป (directional independence) มีความสะดวกในการนำมา

ใช้งาน และสามารถอ่านค่าปริมาณรังสีได้ทันทีที่วัด[4] อุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ภายในประกอบด้วยหัววัดไดโอดจำนวน 1,386 ตัว เรียงตัวแบบบิดเป็นเกลียวรูปทรงกระบอก สามารถวัดปริมาณรังสีได้ทุกมุมการหมุนของเครื่องฉายรังสี[5] ก่อนนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานจริงในทางคลินิก จึงควรมีการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ก่อนนำมาใช้งาน

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้อุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK สำหรับการทวนสอบแผนรังสีรักษา โดยวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงรังสีคณิตของหัววัดและหาอัตราผ่านค่าแกมมา (gamma passing rate) จากแผนรังสีรักษาของผู้ป่วยที่ได้รับการฉายรังสีด้วยเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่งในผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราผ่านค่าแกมมาของแต่ละสถาบันมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรหาอัตราผ่านค่าแกมมาเพื่อใช้กำหนดเป็นแนวทางการประเมินแผนรังสีรักษาของหน่วยงาน

อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

เครื่องฉายรังสีโฟตอนพลังงาน 6 MV รุ่น Primus (Siemens AG, Erlangen, Germany) เครื่องวางแผนรังสีรักษา KonRad Version 2.2.23 (Siemens AG, Erlangen, Germany) อุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK (Sun Nuclear, Melbourne, USA) เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรม SNC Patient™ version 6.2.0 แผนรังสีรักษาเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่งผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอที่เข้ารับการรักษาที่หน่วยรังสีรักษาและมะเร็งวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จำนวน 20 แผน

การตอบสนองต่อปริมาณรังสีเชิงเส้น

จัดตำแหน่ง ArcCHECK ให้จุดตัดลำแสงเลเซอร์อยู่ที่ระยะ SAD 100 เซนติเมตร (SSD = 86.7 เซนติเมตร) เปิดพื้นที่รังสี 10x10 ตารางเซนติเมตร ทดสอบการตอบสนองของหัววัดไดโอด A และ B พิกัด (-5, 0) และ (5, 0) วัดปริมาณรังสีโดยเริ่มจากปริมาณรังสีตั้งแต่ 5-500 MU อ่านค่าปริมาณรังสีที่ไดโอด A และ B วัดได้ และหาค่าเฉลี่ย

ความแม่นยำในการตอบสนองของหัววัดในระยะสั้น

จัดตำแหน่ง ArcCHECK เช่นเดียวกับการทดสอบการตอบสนองต่อปริมาณรังสีเชิงเส้น ฉายรังสีด้วยปริมาณรังสี 100 MU วัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่งหัววัดไดโอดตรงกึ่งกลางของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK ครอบคลุมหัววัดไดโอดจำนวน 6 ตัวภายในพื้นที่รังสีที่กำหนด ได้แก่ หัววัดไดโอดตัวที่ 1 พิกัด (-5, 10) ตัวที่ 2 พิกัด (5, 10) ตัวที่ 3 พิกัด (-5, 0) ตัวที่ 4 พิกัด (5, 0) ตัวที่ 5 พิกัด (-5, -10) และตัวที่ 6 ตำแหน่งพิกัด (5, -10) วัดซ้ำจำนวน 10 ครั้งที่เวลาต่างกัน คำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลของขนาดพื้นที่รังสีต่อการตอบสนองของหัววัด

จัดตำแหน่ง ArcCHECK เช่นเดียวกับการทดสอบการตอบสนองต่อปริมาณรังสีเชิงเส้น ฉายรังสีด้วยปริมาณรังสี 100 MU เปิดพื้นที่รังสี 5x5, 10x10, 15x15, 20x20 และ 25x25 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อ่านค่าปริมาณรังสีที่หัววัดไดโอด A และ B วัดได้ วัดซ้ำสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยบันทึกค่าที่อ่านได้ นำค่าเฉลี่ยไปเทียบกับค่า Output Factor (Sc,p) ของหัววัดรังสีชนิดประจุแตกตัวที่ขนาดพื้นที่รังสีเดียวกัน นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทวนสอบแผนรังสีรักษาเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่ง

ทวนสอบแผนรังสีรักษาเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่งจำนวน 20 แผนที่ได้จากเครื่องวางแผนรังสีรักษา KonRad โดยเริ่มจากการคำนวณปริมาณรังสีตามแผนรังสีรักษาของผู้ป่วยที่ฉายรังสีไปแล้วให้เป็นปริมาณรังสีบนภาพรังสีตัดขวางของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK ส่งออกไฟล์ข้อมูล ได้แก่ DICOM RT Dose และ DICOM RT Plan ไปยังโปรแกรม SNC Patient™ วิเคราะห์ผลการวัดเทียบกับการคำนวณด้วยค่าดัชนีแกมมา คำนวณหาค่าเฉลี่ยอัตราผ่านค่าแกมมาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่เกณฑ์การผ่านค่าแกมมา 3%/3 มิลลิเมตร ค่าขีดจำกัด 10% นำไปใช้ในการหาค่าขีดจำกัดความเชื่อมั่น (confidence limit: CL) ตามสูตร

$$CL = (100 - mean) + 1.96\sigma$$

โดย Mean เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราผ่านค่าแกมมา

σ เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราผ่านค่าแกมมา

นำค่า CL ที่ได้ไปคำนวณหาค่า Tolerance Level[6] ซึ่งเป็นแนวทางการกำหนดอัตราผ่านค่าแกมมาของการทวนสอบแผนรังสีรักษาเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่งภายในหน่วยงาน คำนวณได้จากสมการ

$$\text{Tolerance Level} = (100 - CL)\%$$

ผลการศึกษา

การตอบสนองต่อปริมาณรังสีเชิงเส้น

การทดสอบการตอบสนองต่อปริมาณรังสีเชิงเส้นของหัววัดไดโอดที่ตำแหน่ง A (-5, 0) และ B (5, 0) โดยใช้ปริมาณรังสีตั้งแต่ 5 ถึง 500 MU พบว่าหัววัดไดโอดมีการตอบสนองต่อปริมาณรังสีเป็นเส้นตรง (Figure 1) ค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีที่อ่านได้จากหัววัดไดโอดทั้งสองตำแหน่งมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นกับปริมาณรังสีที่ให้แก่หัววัด (R^2=1.0)

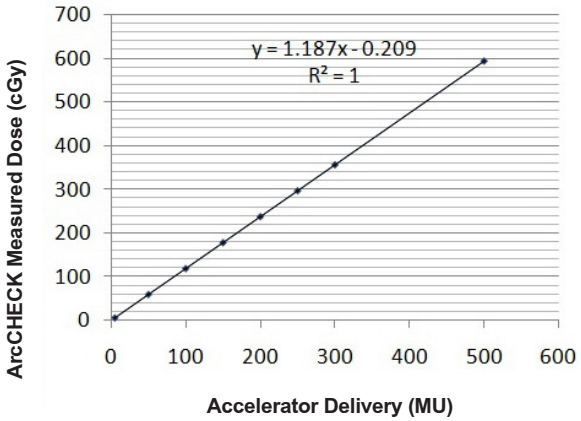


Figure 1 *Dose linearity of ArcCHECK detector. Dose is plotted as function of delivery dose from 5 MU to 500 MU. (R^2=1).*

ความแม่นยำในการตอบสนองของหัววัดในระยะสั้น

การทดสอบความแม่นยำในการตอบสนองต่อรังสีของหัววัดในระยะสั้น ผลการทดลองแสดงค่า relative dose สูงสุดมีค่าเท่ากับ 100.07% และค่าต่ำสุดเท่ากับ 99.94% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.04% และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในการตอบสนองของหัววัดไดโอดจำนวนหกตัวเท่ากับ 0.8 (Figure 2)

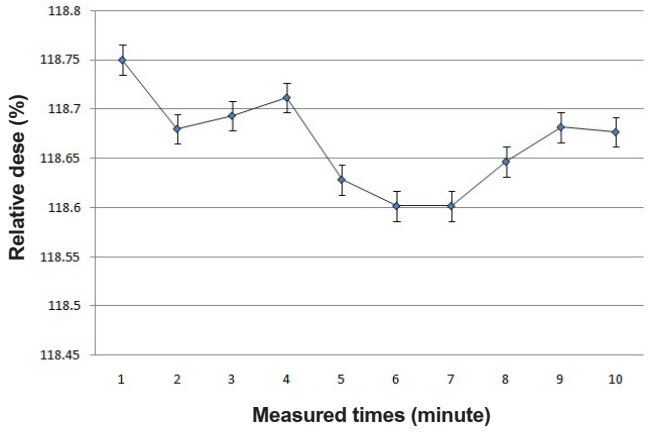


Figure 2 *Short term reproducibility of ArcCHECK detector.*

ผลของขนาดพื้นที่รังสีต่อการตอบสนองของหัววัด

การทดสอบผลของขนาดพื้นที่รังสีต่อการตอบสนองของหัววัด แสดงปริมาณรังสีที่หัววัดไดโอดตำแหน่ง A และ B วัดได้ที่ขนาดพื้นที่รังสีเท่ากับ 5x5, 10x10, 15x15, 20x20 และ 25x25 ตารางเซนติเมตร เป็นปริมาณรังสีสัมพัทธ์ (relative output) ที่วัดด้วยอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK และหัววัดรังสีชนิดประจุแตกตัว (Farmer Type Chamber FC65-P) (Figure 3)

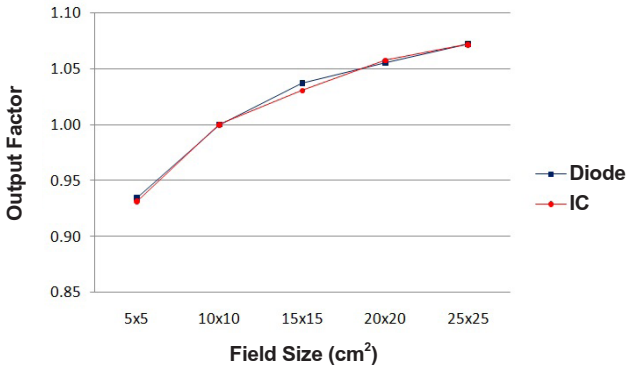


Figure 3 *Field size dependence of ArcCHECK detector for field size 5x5 cm^2 to 25x25 cm^2, compared with measure using Farmer Type Chamber FC65-P.*

ทวนสอบแผนรังสีรักษาเทคนิครังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่ง

พบว่าในทุกแผนรังสีรักษาที่ทวนสอบด้วยอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK มีอัตราผ่านค่าแกมมา (3%/3 มิลลิเมตร) มากกว่า 90% มีค่าเฉลี่ยอัตราผ่านค่าแกมมาเท่ากับ 97.40% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.34 ในจำนวนทั้งหมดมีแผนรังสีรักษาจำนวน 19 แผน มีอัตราผ่านค่าแกมมามากกว่า 95% และมีเพียงแผนเดียวที่มีอัตราผ่านค่าแกมมาเท่ากับ 93.70% (Table 1) คำนวณได้ค่า Tolerance Level เท่ากับ 94.77%

Table 1 Percentage of gamma passing rate for fixed gantry IMRT.

Case No.	3%3 mm (%)	Case No.	3%3 mm (%)
1	97.6	11	98.0
2	95.4	12	98.9
3	96.7	13	93.7
4	96.4	14	97.6
5	98.3	15	97.9
6	97.0	16	96.2
7	97.9	17	98.3
8	98.5	18	96.9
9	99.2	19	97.3
10	96.5	20	99.0
		Average	97.4
		σ	1.34

วิจารณ์ผล

การศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK ในด้านการตอบสนองต่อปริมาณรังสีเชิงเส้น พบว่า ArcCHECK มีการตอบสนองต่อปริมาณรังสีเป็นเส้นตรงที่ดี (R^2=1.0) สอดคล้องกับงานของ Li G และคณะ[7] ทดลองได้ค่า R^2>0.999 และไม่พบจุดอิ่มตัวต่อปริมาณรังสีของหัววัดไดโอดในช่วงปริมาณรังสีที่ทดลอง การศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK ในด้านความแม่นยำในการตอบสนองต่อปริมาณรังสีแบบระยะสั้น พบว่าอุปกรณ์วัดรังสี ArcCHECK ตอบสนองต่อปริมาณรังสีแบบระยะสั้นได้คงที่ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.04% ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Li G และคณะซึ่งทดลองได้ค่าเท่ากับ 0.05% และสอดคล้องกับรายงานของ Kozelka J และคณะ[8] ที่สรุปว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของหัววัดไดโอดแต่ละตัวในการตอบสนองต่อปริมาณรังสีควรมีค่าไม่เกิน 0.3% การศึกษาผลของขนาดพื้นที่ต่อการตอบสนองต่อรังสีของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK พบว่าเมื่อพื้นที่รังสีมีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณรังสีที่หัววัดไดโอดตำแหน่ง A (-5, 0) และ B (5, 0) อ่านค่าได้สูงขึ้นเนื่องจากมีปริมาณรังสีกระเจิงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบผลการวัดกับหัววัดชนิดประจุแตกตัว Farmer-type พบว่าค่า relative output ที่วัดได้จากการเปลี่ยนขนาดพื้นที่รังสีของหัววัดทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกันเช่นเดียวกับงานของ Laojunun P และคณะ[9] การนำอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK มาทวนสอบแผนรังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่งในผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอ จำนวน 20 แผน มีอัตราผ่านค่าแกมมาที่ผ่านเกณฑ์อยู่ในช่วง 93.70% ถึง 99.20% ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับการทวนสอบแผนรังสีรักษาที่กำหนดให้มีค่ามากกว่า 90% ตามข้อแนะนำของ AAPM Task Group 119[6] แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK มีประสิทธิภาพในงานประกันคุณภาพ การเปรียบเทียบผลการวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นพบว่าอัตราผ่านค่าแกมมาที่ได้จากการวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น มีค่าร้อยละความแตกต่างกันสูงสุดน้อยกว่า 5% เมื่อนำค่าเฉลี่ยอัตราผ่านค่าแกมมาและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาหาค่า Tolerance Level ได้ค่าเท่ากับ 94.77% (Table 2)

Table 2 Average percentage of gamma passing rate compare with other studies.

	Average gamma passing rate (%)	σ	TPS	Accelerator
Utitsarn K (2011)	97.21	2.21	Eclipse version 8.6.17	Varian, Clinac iX
Laojunum P (2012)	92.70	4.87	Eclipse version 8.6	Varian, Clinac iX
Li G (2013)	97.50	0.70	Pinnacle version 9.0	Elekta, Synergy
Dance MJ (2014)	98.23	0.01	Pinnacle version 9.6	Varian, TrueBeam
งานวิจัยนี้	97.40	1.34	KonRad version 2.2.23	Siemens, Primus

สรุปผลการศึกษา

การทดสอบคุณสมบัติเชิงรังสีคณิตของอุปกรณ์วัดรังสีรุ่น ArcCHECK พบว่าหัววัดมีคุณสมบัติที่ดีในการวัดและการตอบสนองต่อรังสี การทวนสอบแผนรังสีปรับความเข้มแบบแขนหมุนอยู่นิ่งในผู้ป่วยโรคมะเร็งศีรษะและลำคอที่ได้จากเครื่องวางแผนรังสีรักษา KonRad ทุกแผนมีอัตราผ่านค่าแกมมามากกว่า 90% (อัตราผ่านค่าแกมมาเฉลี่ย 97.40%) แสดงถึงความสอดคล้องกันอย่างดีระหว่างการกระจายปริมาณรังสีที่ได้จากวัดและการคำนวณ ได้ค่า Tolerance Level สำหรับหน่วยงานเท่ากับ 94.77%

เอกสารอ้างอิง

1. Radiation Therapy for Cancer. Website: http://www.cancer gov/ cancertopics/factsheet/Therapy/radiation. 1 April 2016.
2. Van Dyk J, et al. Commissioning and Quality Assurance of Treatment Planning Computers. International Int J Radiat Oncol Biol Phys 1993; 26(2): 261-73.
3. Hussein M, et al. A comparison of the gamma index analysis in various commercial IMRT and VMAT QA systems. Radiother Oncol 2013; 109(3): 370-6.
4. Chaswal V, et al. Commissioning and comprehensive evaluation of the ArcCHECK cylindrical diode array for VMAT pretreatment delivery QA. Journal of applied clinical medical physics; J Appl Clin Med Phys 2014; 15(4): 212-24.
5. ArcCheckTM Reference Guide. Sun Nuclear Corporation. 2013.
6. Ezzell GA, et al. IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparisons; a report from AAPM Task Group 119. Med Phys 2009; 36(11): 5359-72.
7. Li G, et al. Evaluation of the ArcCHECK QA System for IMRT and VMAT Verification. Physica Medica J Appl Clin Med Phys 2013; 29: 295-303.
8. Kozelka J, et al. Optimizing the accuracy of a helical diode array dosimeter: a comprehensive calibration methodology coupled with a novel virtual inclinometer. Med Phys 2011; 38(9): 5021-32.
9. Laojunun P, et al. Evaluation of Planar and Cylindrical Diode Arrays for IMRT and VMAT Plan Verification. Thesis and Dissertations, Mahidol University. 2012.
10. Utitsarn K, et al. Dosimetric verification of 2 D planar diode arrays and 3 D cylindrical diode arrays in IMRT and VMAT. Thesis and Dissertations, Chulalongkorn University. 2011.
11. Dance JM, et al. A Comparative Analysis for Verification of IMRT and VMAT Treatment Plans Using a 2D and 3D Diode Array. Thesis and Dissertations, University of Toledo. 2014.