

นิพนธ์ต้นฉบับ (Original article)

ชีวกลศาสตร์ทางการกีฬา (Sports Biomechanics)

การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแฟลท์จากหน้าไม้แร็กเกต สามรูปแบบโครงสร้างด้วยการจำลองจากเครื่องทดสอบ

ชัยสิทธิ์ ภาวิลาศ¹ และ เฉลิม ชัยวัชรภรณ์²

คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์¹

วิทยาเขตตรังเกล้า: 77 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510

คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย² ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกตสามโครงสร้างผลิตภัณฑ์คือ สี่เหลี่ยม (RR), สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูงที่ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (ω) เท่ากับ 49.98 องศาต่อวินาที ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) นำข้อมูลมาวิเคราะห์ตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส 5 ตำแหน่ง และเปรียบเทียบระหว่างไม้เทนนิสทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง (Two-way ANOVA) ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ในทดสอบการเสิร์ฟจากสามโครงสร้างทำจากวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์เหมือนกัน แตกต่างกันที่โครงสร้างและวัสดุส่วนประกอบเพิ่ม พบว่าการปล่อยลูกเทนนิสลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิสคล้ายกับการเสิร์ฟจริง โดยค่าความเร็วลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-ball impact velocity) ของไม้แร็กเกตทั้งสามก่อนกระทบ 5 ตำแหน่งมีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ โดยแต่ละตำแหน่งมีค่าความเร็วลูกแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ $p < 0.05$ ยกเว้นจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (GSC) กับจุดกระทบที่ 5 ที่อยู่ระดับเดียวกันแต่เยื้องออกไปทางขวา

สรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสทั้ง 5 ตำแหน่ง พบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact ball velocity) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. ของทั้งสามโครงสร้าง เท่ากับ 44.436 ± 0.193 , 45.401 ± 0.211 และ 45.491 ± 0.199 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) เรียงตามลำดับ มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ เมื่อเทียบกับจุดกระทบอื่นๆที่เหลืออีก 4 ตำแหน่ง สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วไม้ก่อนกระทบ (Smash ratio) ที่แสดงประสิทธิภาพของแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ ซึ่งค่าเฉลี่ยอัตราส่วน ณ จุดกระทบที่ 2 ของทั้งสามโครงสร้างคือ 1.444 ± 0.011 , 1.469 ± 0.017 และ 1.472 ± 0.023 เรียงตามลำดับ ยังคงมีค่ามากที่สุดเช่นกัน ทั้งนี้พบว่าโครงสร้างไม้รูปแบบวงรี RO ค่าอัตราส่วนที่จุดกระทบที่ 2, 3, 4 และ 5 มีแนวโน้มสูงมากกว่า RR และ RT รวมถึงมีค่าความแข็งแรงไม้แร็กเกตและค่าน้ำหนักการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้สูงที่สุด มีค่าน้ำหนักที่หัวไม้แร็กเกตมากกว่า และมีค่าความตึงของเอ็นบนหน้าไม้เป็นลำดับที่สองหลังขึ้นความตึงเอ็นเท่านั้น น่าจะเป็นไม้แร็กเกตที่มีประสิทธิภาพดีกว่าสองรูปแบบโครงสร้างที่เหลือ ผลการศึกษานี้แนะนำให้ผู้เล่นเทนนิสสามารถเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตได้ตรงตามที่ต้องการ เพื่อเสิร์ฟลูกแรงให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

(Journal of Sports Science and Technology 2014;14(2): 1-26)

คำสำคัญ: ความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส, การเสิร์ฟลูกแฟลท์, รูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกต

นิพนธ์ต้นฉบับ (Original article)

ชีวกลศาสตร์ทางการกีฬา (Sports Biomechanics)

COMPARISON IN MAXIMUM BALL VELOCITY OF 3-STRUCTURAL CHARACTERISTIC RACKETS USING SIMULATED TENNIS FLAT SERVE

Chaiyasith PAVILAS¹ and Chalerm CHAIWATCHARAPORN²

Faculty of Sports Science, Kasem Bundit University¹

Romklao Campus: 77 Romklao Rd., Minburi, Bangkok 10510

Faculty of Sports Science, Chulalongkorn University² Praram 1 Rd., Pathumwan, Bangkok 10330

ABSTRACT

This research aimed to study maximal tennis ball velocity at various impact locations of tennis rackets among 5 different positions (P1-P5) using a racket testing machine and to compare efficiency in 3-structural characteristic of rackets. Data were collected from striking tennis balls by clamped handle racket with the machine driven at 450 rpm and 3D motion analyzed via two high speed cameras (2,000-Hz). This study focused on ball-racket interaction of flat serve at Pre-impact and Post-impact at afore-mentioned impact locations and smash ratios by 3-structural head of rackets (RR-rectangle, RT-triangle and RO-oval shapes) models. Two way ANOVA measures were used to analyze the data.

The results showed that resultant ball_{pre} velocities of these positions (P1-P5) in all rackets differed statistically at $p < 0.05$ level of significance (LSD), except at P5 that offset at P3 (GSC) to the right. However, the ball_{post} velocities of RR model at P2 (0, 30; $44.436 \pm 0.193 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) was significantly greater than corresponding value of other locations. This phenomenon was also occurred in RT and RO models. While, racket_{pre} velocities of all by GSC referred were practically near the same. Therefore, smash ratio (ball_{post}/racket_{pre}) of 3-structural racket models, in which the highest ball velocity also occurred at location P2 (0, 30), were 1.444 ± 0.011 , 1.469 ± 0.017 และ 1.472 ± 0.023 respectively in each model but no significant difference.

Conclusion with equal speed at 450 rpm, impact location 30 mm distance above GSC of racket face was shown to produce maximum ball velocity and corresponding its smash ratio, respectively. In comparing the efficiency in 3-structural rackets, the smash ratio in RO model has tendency to build the highest ball speed higher than RR and RT models. This implies that concept of maximum ball outbound velocity could be utilized to effectively customize a tennis player's typical first serve style as previous studies.

(Journal of Sports Science and Technology 2014;14(2): 1-26)

KEYWORDS: Tennis flat serve, Maximal ball velocity, Structural characteristic of racket

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การศึกษาวิเคราะห์เกมการแข่งขันเป็นที่ยอมรับกันแล้วว่า ลูกเสิร์ฟเป็นการตีลูกที่ทำให้ผู้เล่นได้เปรียบผู้เล่นฝ่ายตรงกันข้าม (Trabert, 1984: ศิลปชัย สุวรรณธาดา, 2552) เพราะลูกที่เริ่มเล่นของการแข่งขันในแต่ละแต้ม ผู้เสิร์ฟสามารถที่จะควบคุมการเสิร์ฟ ไม่ว่าจะเป็นความเร็ว การหมุนของลูก และตำแหน่งที่ต้องการให้ลูกตกลงในคอร์ตบริเวณใด ดังนั้น ในการลูกเสิร์ฟแรกได้ดีและรุนแรงขณะการแข่งขัน จึงเป็นปัจจัยความสำคัญที่ทำให้ผู้เสิร์ฟมีโอกาสได้รับชัยชนะ โดโนเกอและบอลเลนตินี (Donoghue, Ballantyne, 2004) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลขอความเร็วของการเสิร์ฟลูกเทนนิสประเภทชายและหญิงเดี่ยวทั้ง 4 รายการ ได้แก่ ออสเตเรียเลียโอเฟ่น เฟรนช์โอเฟ่น วิมเบิลดัน และยูเอสโอเฟ่นในปี 2002 พบว่าในประเภทชาย เมื่อผู้เสิร์ฟสามารถเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองลง ผู้เสิร์ฟลูกแรกจะมีโอกาสทำคะแนนเฉลี่ยสูงถึง 68-74 % ซึ่งมากกว่า ผู้เสิร์ฟลูกที่สอง (56-58%) ส่วนในประเภทหญิงการเสิร์ฟลูกแรกจะมีโอกาสทำคะแนนเฉลี่ยมากกว่าลูกที่สองเช่นกัน

จากการรายงานผลการแข่งขันกีฬาเทนนิสในระดับนานาชาติด้วยระบบคอมพิวเตอร์ฮาร์ดแวร์ (Cross, Pollard, 2009: ITF, 2009) พบว่านักเทนนิสชายระดับแนวหน้าของโลกในปัจจุบันเสิร์ฟลูกเทนนิสให้มีความเร็วสูงสุดเกือบ 259 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (156 ไมล์ต่อชั่วโมง โดย Ivo Karlovic และ 155 ไมล์ต่อชั่วโมง) และพบว่านักเทนนิสหญิงระดับแนวหน้าของโลกในปัจจุบันสามารถเสิร์ฟลูกเทนนิสให้มีความเร็วสูงสุดเกือบ 208 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เช่นกัน (129 ไมล์ต่อชั่วโมง โดย Venus Williams) ซึ่งจาก ค.ศ. 1870s ถึง 2007 พบว่าความเร็วของลูกเทนนิสในขณะเสิร์ฟ (serve speed) เพิ่มขึ้นถึง 17.5 % (Haake et al., 2007) ทั้งนี้ถ้าจุดกระทบบนเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตต่างกันเพียง 20 มิลลิเมตร จะทำให้ลูกเทนนิสตกลงพื้นต่างกันถึง 1.45 เมตร

ในการวิจัยการเสิร์ฟลูกแรก (first serve) หรือลูกแฟลท์ (flat serve) ด้วยวิธีการเสิร์ฟลูกโดยตรงจากเครื่องทดสอบ (real strike) ปัจจุบันมีรายงานศึกษาวิจัยดังกล่าวน้อยมาก เพราะมีข้อจำกัดในการทดลอง (Choppin, 2013) ทั้งในตัวนักกีฬาที่ไม่สามารถเสิร์ฟลูกให้ตรงตำแหน่งจุดกระทบที่ต้องการซ้ำๆ ได้ทุกครั้ง หรือจากเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยที่สร้างแบบจำลองการเสิร์ฟลูกด้วยการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบไม้แร็กเกต อาทิเช่นการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบหน้าไม้ที่แขวนในแนวตั้งและติดเครื่องมือวัดแรงสั่น (Cross, 1998) เพื่อคำนวณหาจุดที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (first sweet spot: vibration node) ทั้งนี้แตกต่างกับการเสิร์ฟลูกแฟลท์ที่ไม้เทนนิสมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมากเพื่อเข้ากระทบลูกเทนนิสที่เกือบจะหยุดนิ่งในขณะเสิร์ฟจริง ซึ่งจุดกระทบที่ทำให้เกิดความเร็วลูกสูงสุดน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเดิม (Choppin, 2013) ดังนั้นการศึกษาเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสครั้งนี้ จึงเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่ยังไม่เคยมีรายงานวิจัยมาก่อน

วัตถุประสงค์

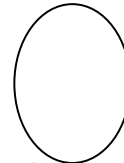
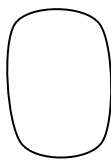
เพื่อเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดลูกเทนนิสหลังกระทบเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตจาก 3 รูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน และศึกษาพฤติกรรม (behavior) ของลูกเทนนิสขณะกระทบ โดยการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ จากการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ (flat serve) ด้วยเครื่องทดสอบไม้เทนนิส

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณแบบทดลองในห้องปฏิบัติการโดยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์จากเครื่องทดสอบลูกและไม้เทนนิส (Tennis ball and racket tester) ขั้นตอนในการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. นำไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศที่สุ่มเลือกแบบเฉพาะเจาะจงเป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้คือ สีเหลี่ยม (RR), สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) มาขึ้นเอ็นชนิดเดียวกันยี่ห้อ Babolat-Pro Hurricane โดยกำหนดความตึงของเอ็นที่ขึ้นบนหน้าแร็กเกตเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 60 ปอนด์ ซึ่งใกล้เคียงกับที่กลุ่มนักกีฬาระดับชาติและนานาชาติส่วนใหญ่ใช้ (วัดด้วยเครื่องมือวัดความตึง Gosen TM-880) และปล่อยให้มีความตึงมีค่าคงที่ประมาณ 3 วัน ก่อนเริ่มทดสอบ

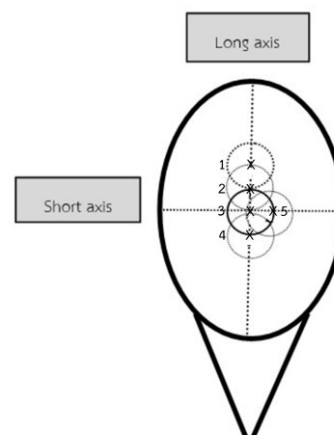
รูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกต



สีเหลี่ยม (RR: Yonex: VCORE 95D) สามเหลี่ยม (RT: Prince: EX03 Tour100) วงรี (RO: ยี่ห้อBabolat: Pure Strom GT)

2. การจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยนำไม้แร็กเกตมาติดตั้งและยึดไว้กับแท่นหมุนเหวี่ยงที่สามารถปรับตั้งค่าความเร็วในการหมุนได้ และสามารถปรับเพื่อหาตำแหน่งจุดกระทบของลูกเทนนิสบนเอ็นหน้าไม้ 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน จากชุดอุปกรณ์ความคมการปล่อยลูก ได้แก่ ตำแหน่ง 1, 2, 3 (จุดกลางหน้าไม้แร็กเกตคือ 0, 0: Geometric String-bed Center-GSC), 4 และ 5 ดังรูปที่ 1. ทำการทดสอบแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้จำนวน 8-12 ครั้ง โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm ซึ่งใกล้เคียงกับ

Simulation Position	Impact distance (mm) along	
	Short axis	Long axis
1	0	60
2	0	30
3	0	0
4	0	-30
5	30	0



รูปที่ 1. แสดงตำแหน่งจุดกระทบที่แตกต่างกันทั้ง 5 คือ ตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (Short axis=0, Long axis=60), ตำแหน่งที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30), ตำแหน่งที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (0, 0: Geometric String-bed Center-GSC), ตำแหน่งที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0,-30) และตำแหน่งที่ 5 เยื้องจากจุดกลางหน้าไม้ไปทางขวา 30 มม. (30, 0) ตามรูปภาพ

ค่าเฉลี่ยความเร็วของไม้แรกเกิดในขณะเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสที่เคยมีการรายงานผลการวิจัยมาก่อน ทั้งนี้กำหนดจุดกระทบสำหรับรูปแบบโครงสร้างไม้แรกเกิดแรก (RR) คือตำแหน่งที่ 3, 2, 1, 4 และ 5 สำหรับรูปแบบโครงสร้างไม้ที่สอง (RT) คือตำแหน่ง 1, 2, 3, 4 และ 5 และไม้ที่สาม (RO) คือตำแหน่ง 2, 1, 3, 5 และ 4 เรียงตามลำดับ ทั้งนี้ในการทดลองยังเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ลูกเทนนิสที่นิยมใช้ในรายการแข่งขันระดับนานาชาติคือยี่ห้อ Wilson US Open ลูกเทนนิสถูกทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติในการกระด้างลูกเทนนิส (ball bouncing) ตรงตามข้อกำหนดสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (International Tennis Federation: ITF, 2009) ทั้งนี้เพื่อควบคุมปัจจัยต่างๆที่อาจจะส่งผลการวิจัยให้มากที่สุด และใช้ทดสอบในการเสิร์ฟไม้ไม่เกิน 45 ครั้ง โดยวัดความตึงของเส้นเอ็นก่อนทดสอบซ้ำทุกๆ 3 ครั้ง

3. เลือกลูกเทนนิสที่กระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุดจุดละ 5 ลูก (จาก 8-12 ครั้ง) อาทิเช่นตำแหน่งจุดกระทบที่ 1 เหนือกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60: a tennis ball distance above GSC) แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่อง เพื่อหาอัตราเร่ง ความเร็วและพฤติกรรมการเข้ากระทบของลูกเทนนิส ที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกในแต่ละครั้ง จากกล้องความเร็วสูง



จำนวน 2 ตัว ทั้งนี้ความเร็วหน้าไม้ ณ จุดกระทบลูกเทนนิสในแต่ละตำแหน่งคำนวณได้จากสมการ: $V = \omega r$ โดย V คือความเร็วหน้าไม้, ω คือความเร็วเชิงมุมของไม้ และ r คือรัศมีระยะทางจากจุดหมุนถึงจุดกระทบกลางหน้าไม้ หรือสามารถคำนวณจากความเร็วหน้าไม้จากค่าเฉลี่ยความเร็วตำแหน่งปลายหัวไม้ (tip-marker) และคอไม้เทนนิส (shoulder-marker) รวมกัน แล้วหารด้วย 2

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way Analysis of Variance) หากพบความแตกต่างจึงทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบรายคู่ ด้วยวิธีแบบแอลเอสดี (LSD) ที่ระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ด้วย SPSS/PC Window Version 11.5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆจากการทดสอบในการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในแต่ละผลิตภัณฑ์ตามกระบวนการทดสอบ โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แรกเกิดที่ระดับสูง แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ เพื่อหาอัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกในแต่ละครั้ง มีรายละเอียดดังนี้

ในตารางที่ 1. แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไม้แรกเกิดในแต่ละชนิดตามโครงสร้างและรุ่นอันใหม่ที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาติใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขันระดับนานาชาติ พบว่าผลิตภัณฑ์ไม้แรกเกิดที่นักเทนนิสนิยมใช้ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (RR, RT และ RO) ทำจากวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์เหมือนกัน ยกเว้นมีส่วนผสมวัสดุแรกเกิดที่แตกต่างกันบ้าง ไม้แรกเกิดทั้งสามโครงสร้างมีความยาวเท่ากัน 68.58 ซม. มีน้ำหนักพร้อมเอ็นที่ขึ้นมีค้ำระหว่าง 312-338 กรัม ขนาดหน้าไม้แรกเกิดมีพื้นที่ระหว่าง 95-100 ตารางนิ้ว ซึ่งเป็นหน้าไม้ขนาด Mid-plus (พื้นที่ 94-105 ตารางนิ้ว) ทั้งนี้โมเมนต์ความเฉื่อยที่เกิดขึ้นขณะการออกแรงตี (moment of inertia) หรือน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แรกเกิด (swing weight) มีค้ำระหว่าง 317-327 ความแข็งแกร่งของไม้แรกเกิด (stiffness) มีค้ำระหว่าง 52-63 และส่วนใหญ่มียุคสมดุลของน้ำหนักไม้ (balance) ระยะห่างจากจุดสมดุลของมวลไม้แรกเกิด (racket mass) คือ 7 (น้ำหนักที่หัว

ไม้เบา) ยกเว้น RO มีค่าเท่ากับ 1 แสดงถึงน้ำหนักที่หัวไม้ของไม้เร็กเกต RO มากกว่าไม้เร็กเกตของ RR และ RT ซึ่ง เป็นไปตามข้อกำหนดด้านเทคนิคของสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (ITF, 2009)

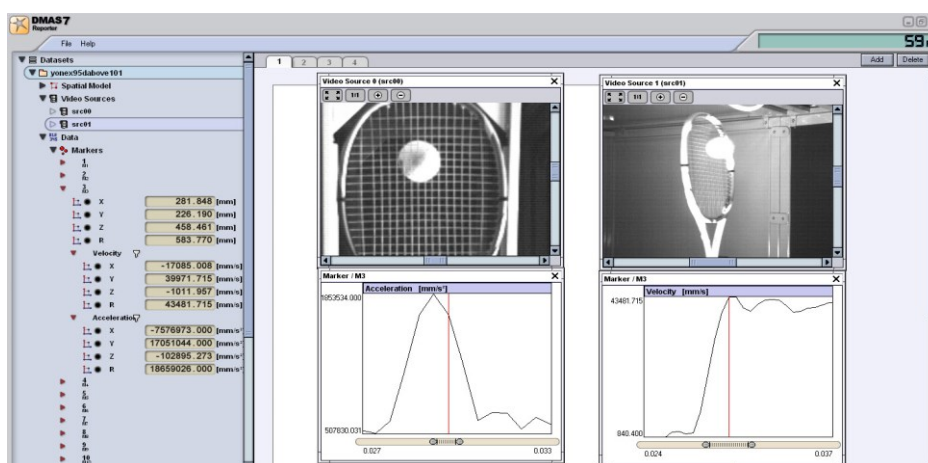
ตารางที่ 1. แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ไม้เร็กเกตในแต่ละชนิดตามโครงสร้าง และไม้รุ่น เดียวกันอันใหม่ที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาติใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขันระดับนานาชาติ

Technical specification							
Model	Composition	Length (cm.)	Strung weight (g.)	Head size (sq. in.)	Swing weight (kg.cm ²)	Stiffness (Hz)	Balance (pts HL)
RR : Yonex VCORE 95D	Graphite X-Fullerene	68.58	337.36	95	317	63	7
RT : Prince EXO3 Tour 100 16x18	Graphite	68.58	328.85	100	323	52	7
RO : Babolat Pure Strom GT	Graphite Tungsten	68.58	312.00	98	327	63	1

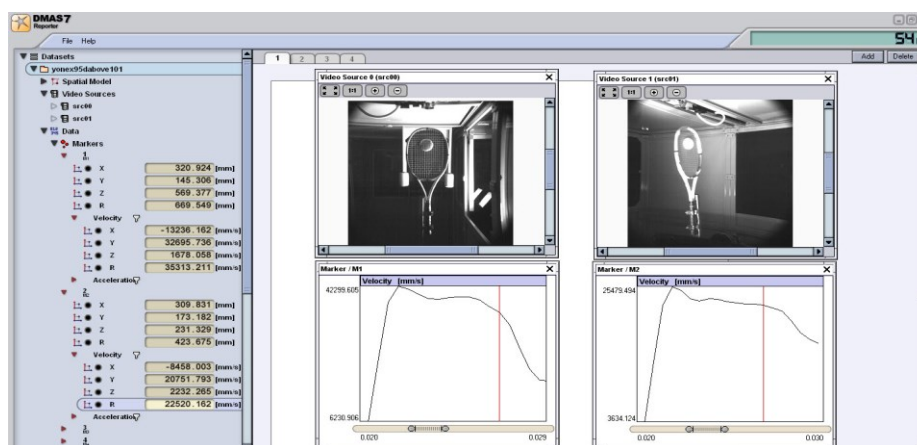
ในรูปที่ 2. แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในผลิตภัณฑ์แรก คือ RR ทำจากวัสดุ Graphite-Fullerene มีพื้นที่ขนาดหน้าไม้ 95 ตารางนิ้ว ขึ้นเอ็นให้มีความตึงเริ่มต้นที่ 60 ปอนด์ หลัง 3 วันต่อมา มีค่าความตึงประมาณ 54.9 ปอนด์ จึงเริ่มการทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ พบว่าในขณะที่เสิร์ฟด้วยเครื่องทดสอบ ณ จุดกระทบของลูกเทนนิสบนเอ็นหน้าไม้ ตำแหน่ง 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. แสดงภาพการเข้ากระทบของลูกเทนนิสแบบต่อเนื่องได้ถึง 8 รูปภาพ ใช้เวลาเพียง 4 มิลลิวินาที (millisecond) โดยภาพสุดท้ายคือ ภาพที่ 8 เป็นการเคลื่อนที่ของลูกออกจากเอ็นบนหน้าไม้หลังกระทบ (outbound) พบว่าลูกเทนนิสขณะกระทบบนเอ็นหน้าไม้จะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามการถ่ายเทของพลังงานที่ให้กับเอ็นบนหน้าไม้ของแต่ละตำแหน่งกระทบ รวมถึงการสปริงตัวและส่งพลังงานกลับให้กับลูกเทนนิสตามรูปภาพที่ 2a. (ภาพบนขวา จากกล้องตัวที่ 1 และภาพซ้ายตัวที่ 2) ในขณะที่ลูกเทนนิสมีค่าความเร็วสูงสุด (maximum velocity of ball outbound) เท่ากับ 43.48 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) ตามรูปภาพที่ 2a. (กราฟล่างขวา) ลูกเทนนิสมีค่าอัตราเร่ง (acceleration) เริ่มลดลงช่วงแรกมีค่าเท่ากับ 186.6×10^5 เมตรต่อวินาที² (ms^{-2}) ดังรูปภาพ (กราฟล่างซ้าย) ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์การเข้ากระทบของลูกเทนนิสแบบต่อเนื่องอีก 4 ตำแหน่งที่เหลือ มีลักษณะคล้ายกันกับตำแหน่ง 1 แตกต่างกันเฉพาะเพียงค่าอัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่มากขึ้น หรือน้อยลงหลังลูกเทนนิสเข้ากระทบเท่านั้น พบอีกว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (Post-impact ball velocity, n=5) ณ จุดกระทบตำแหน่ง 1 (0, 60) เท่ากับ 43.482 ± 0.281 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) ในตารางที่ 2. โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบตำแหน่ง 2. เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30: an half a ball distance above GSC) เท่ากับ 44.436 ± 0.193 เมตรต่อวินาที มีค่ามากที่สุด และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ $p < 0.05$ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุด

ของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 1 ถึง 5 ของรูปแบบโครงสร้างไม้ RR คือ 43.482 ± 0.281 , 44.436 ± 0.193 , 43.701 ± 0.290 , 43.668 ± 0.201 และ 43.578 ± 0.314 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ รองลงมาจากจุดกระทบที่ 2 คือ ความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แรกเกิด (0, 0) โดยตำแหน่งจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสต่ำที่สุด

ในขณะที่ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบ RR ณ จุดกระทบที่ 1 ตามรูปที่ 2b. พบว่าความเร็วตำแหน่งปลายหัวไม้ (top: M1) ตามกราฟล่างซ้าย และตำแหน่งต่ำสุดของหัวไม้แรกเกิด (bottom: M2) ตามกราฟล่างขวา มีค่าเท่ากับ 39.313 และ 22.520 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ ซึ่งคำนวณหาความเร็วของไม้แรกเกิด RR ก่อนกระทบ (Pre-impact



(a)



(b)

รูปที่ 2. แสดงรูปภาพอัตราเร่ง (acceleration) และความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด (maximum velocity of ball) หลังกระทบ หน้าไม้แรกเกิด RR (outbound) ณ จุดกระทบตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. ตามลำดับ (รูปบน: 2a) รวมถึงความเร็วตำแหน่งปลายหัวไม้ (top: M1) และต่ำสุด (bottom: M2) ตามลำดับ (รูปล่าง: 2b) ซึ่งแสดงค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบ โดยกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm racket velocity) จุดกระทบที่ 1 เท่ากับ 30.916 เมตรต่อวินาที โดยค่าเฉลี่ยความเร็วของไม้ RR ก่อนกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง มีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ 30.903 ± 0.258 , 30.840 ± 0.267 , 30.823 ± 0.305 , 30.795 ± 0.266 และ 30.802 ± 0.298

เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ ดังตารางที่ 2. และพบค่าความเร็วของไม้แร็กเกตโครงสร้าง RT และ RO ก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ณ จุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง คล้ายโครงสร้าง RR และมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้ค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบหน้าไม้ (Pre-impact ball velocity) ของไม้แร็กเกต RR ในตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 คือ 2.244 ± 0.235 , 2.612 ± 0.153 , 3.387 ± 0.273 , 3.523 ± 0.147 และ 3.391 ± 0.355 เมตรต่อวินาที มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ เนื่องจากจุดกระทบที่ 1 หนีจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. อยู่ใกล้ปลายหัวไม้เทนนิสมีระยะทางจากจุดปล่อยลูกเทนนิสสั้นกว่าจุดกระทบอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกัน พบค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนเข้าของแต่ละตำแหน่งมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ $p < 0.05$ ยกเว้นจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับจุดกระทบที่ 5 (30, 0) ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เยื้องออกไปทางขวา ทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบมีค่าใกล้เคียงกัน

ในตารางที่ 2. แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆจากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิส ในสามรูปแบบโครงสร้าง ทำจากวัสดุชนิดกราไฟท์เหมือนกัน แตกต่างกันที่รูปแบบโครงสร้าง รวมถึงพื้นที่ขนาดหน้าไม้แร็กเกต น้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้ ความแข็งแรงของไม้แร็กเกต และจุดสมดุลของน้ำหนักไม้ ตามตารางที่ 1. หลังขึ้นเอ็นให้มีความตึงเริ่มต้นเท่ากัน 60 ปอนด์ ทั้งนี้ความตึงของเอ็นบนหน้าไม้ทั้งสามโครงสร้างผลิตภัณฑ์มีการลดลงเรื่อยๆ และมีค่าค่อนข้างจะคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงน้อยในช่วงเวลาประมาณ 3 วันต่อมา โดยมีค่าความตึงประมาณ 54.9, 50.8 และ 53.4 ปอนด์ เรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบทั้ง 5 ในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 (0, 30) ทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง คือ RR, RT และ RO เท่ากับ 44.436 ± 0.193 , 45.401 ± 0.211 และ $45.491 \pm$

ตารางที่ 2. แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบใน 3 รูปแบบ
 โครงสร้าง: ค่าเฉลี่ยความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket) และความเร็วลูก
 เทนนิสสูงสุดหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball) ในแต่ละจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง รวมถึงแสดงค่า
 อัตราเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ($Ball_{post}/Racket_{pre}$) โดย
 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm (mean±S).

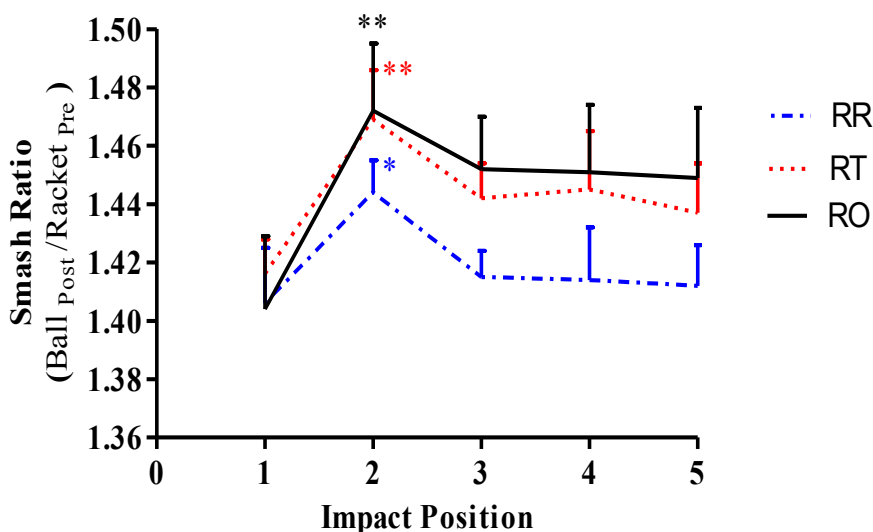
Parameters	Impact Locations (n=5) of 3 Typical Characteristic of Rackets				
	1: (0, 60) (one-ball above)	2: (0, 30) (half-ball above)	3: (0, 0) (GSC- center)	4: (0, -30) (half-ball below)	5: (-30, 0) (off- center)
Racket-RR	43.482 ±	44.436 ±	43.701 ±	43.668 ±	43.578 ±
Ball Velocity ($m \cdot s^{-1}$) Post-impact	0.281	0.193*	0.290	0.201	0.314
Racket Velocity ($m \cdot s^{-1}$) - Pre-impact	30.903 ± 0.258	30.840 ± 0.267	30.823± 0.305	30.795± 0.266	30.802± 0.298
Smash Ratio - $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.406 ± 0.019	1.444 ± 0.011*	1.415 ± 0.009	1.414 ± 0.018	1.412 ± 0.014
Racket-RT	43.856 ±	45.401 ±	44.480 ±	43.515 ±	43.229 ±
Ball Velocity ($m \cdot s^{-1}$) Post-impact	0.290	0.211*	0.287	0.236	0.331
Racket Velocity ($m \cdot s^{-1}$) - Pre-impact	30.926 ± 0.281	30.895 ± 0.232	30.816± 0.261	30.804± 0.285	30.828± 0.210
Smash Ratio - $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.416 ± 0.012	1.469 ± 0.017**	1.442 ± 0.012	1.445 ± 0.020	1.437 ± 0.017
Racket-RO	43.812 ±	45.491 ±	44.439 ±	44.435 ±	44.429 ±
Ball Velocity ($m \cdot s^{-1}$) Post-impact	0.390	0.199*	0.267	0.244	0.322
Racket Velocity ($m \cdot s^{-1}$) - Pre-impact	30.977 ± 0.242	30.899 ± 0.267	30.884± 0.305	30.699± 0.304	30.743± 0.234
Smash Ratio - $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.404 ± 0.025	1.472 ± 0.023**	1.452 ± 0.018	1.451 ± 0.023	1.449 ± 0.024

*Significant difference from the other impact locations in each racket.

**Significant difference from the P1 location in each racket.

0.199 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยไม้แร็กเกต RO และ RT มีแนวโน้มมากกว่า RR แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือในแต่ละโครงสร้าง ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสรองลงมาจากจุดกระทบที่ 2 คือ จุดกระทบที่ 3 (GSC) ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างเหมือนกัน ซึ่งมีค่าเรียงตามลำดับตามโครงสร้างคือ 43.701 ± 0.290 , 44.480 ± 0.287 และ 44.439 ± 0.297 เมตรต่อวินาที โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 3 ของไม้แร็กเกต RT และ RO มีแนวโน้มมากกว่า RR แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบอีกว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามรูปแบบโครงสร้างคือ 43.482 ± 0.281 , 43.856 ± 0.280 และ 43.812 ± 0.390 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับตามโครงสร้างในตารางที่ 2. ยังพบว่าค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ($\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$: Smash ratio) ณ จุดกระทบทั้ง 5 ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้างของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO ค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกต ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเรียงตามรูปแบบโครงสร้างคือ เท่ากับ 1.444 ± 0.011 , 1.469 ± 0.017 และ 1.472 ± 0.023 เรียงตามลำดับ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังรูปที่ 3. อย่างไรก็ตามพบว่าค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้ ณ จุดกระทบที่ 2 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดนั้น ไม้แร็กเกต RO และ RT มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มมากกว่าไม้แร็กเกต RR แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในสามโครงสร้าง ทั้งนี้ค่าอัตราส่วน เฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต รองลงมาจากจุดกระทบที่ 2 คือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (1.415 ± 0.009 , 1.442 ± 0.012 และ 1.452 ± 0.016 เรียงตามลำดับ) ซึ่งใกล้เคียงกับจุดกระทบที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. และจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา โดยไม้แร็กเกต RR และ RO มีแนวโน้มของค่าอัตราส่วนนี้ค่อยๆ ลดลงต่อเนื่อง ทั้งนี้แตกต่างจากไม้แร็กเกต RT ที่มีค่าค่อนข้างคงที่ในจุดกระทบที่ 4 แล้วจึงลดลงในตำแหน่งจุดกระทบ 5 ดังนั้นค่าอัตราส่วนของรูปแบบไม้แร็กเกต RO จุดกระทบตำแหน่ง 2, 3, 4 และ 5 มีแนวโน้มสูงมากกว่า RR และ RT แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังรูปที่ 3. ยังพบอีกว่าค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต ณ จุดกระทบที่ 1

The Ball-Racket Interaction of Flat Serve



รูปที่ 3. แสดงการเปรียบเทียบกราฟค่าอัตราเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Smash ratio: $Ball_{post}/Racket_{pre}$) จากทดสอบการเสิร์ฟฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบใน 3 รูปแบบโครงสร้าง (RR, RT และ RO) ทั้ง 5 ตำแหน่งจุดกระทบ โดยจุดกระทบที่ 2 (0, 30) เหนือจุดกลาง 30 มม. มีค่าสูงที่สุด ซึ่งกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ 450 rpm เท่ากัน

*Significant difference from the other impact locations in each racket.

**Significant difference from the P1 location in each racket.

(0, 60) มีค่าน้อยที่สุดของทั้งสามรูปแบบโครงสร้างและมีค่าใกล้เคียงกันมาก เท่ากับ 1.406 ± 0.019 , 1.416 ± 0.012 และ 1.404 ± 0.025 เรียงตามลำดับ จึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างโครงสร้าง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเฉลี่ยดังกล่าว ณ จุดกระทบทั้ง 5 ของไม้แร็กเกตแต่ละโครงสร้าง พบว่ามีเพียงจุดกระทบที่ 1 กับจุดกระทบที่ 2 ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกตจากสามรูปแบบโครงสร้างตามตัวอย่างในแต่ละผลิตภัณฑ์ ด้วยการจำลองการเสิร์ฟฟลูกพลัทช์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องขณะลูกกระทบเอ็นบนหน้าไม้เทนนิสแบบ 3 มิติ ในผลิตภัณฑ์แรก คือ RR พบว่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 1 ของไม้แร็กเกต RR หลังจากลูกกระทบเอ็นบนหน้าไม้ เท่ากับ 43.48 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) ตามรูปกราฟที่ 2a. (กราฟล่างขวา) สอดคล้องกับไชว์และคณะ (Chow et al., 2003) ที่รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการเสิร์ฟฟลูกแรกและลูกที่สองจากนักเทนนิสประเภทเดี่ยวในกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า ปี ค.ศ. 1996 พบว่าการเสิร์ฟฟลูกแรกนั้นมีความเร็วของลูกเสิร์ฟมากกว่าการเสิร์ฟฟลูกที่สองถึง 24.1 % โดยในประเภทชายเดี่ยว (ค่าเฉลี่ยความเร็วของลูก

เสิร์ฟลูกแรกต่อลูกที่สอง เท่ากับ $50.33 \text{ vs. } 37.80 \text{ ms}^{-1}$, $p < 0.01$) และในประเภทหญิงเดี่ยว (ความเร็วของลูกเสิร์ฟลูกแรกต่อลูกที่สอง เท่ากับ $42.06 \text{ vs. } 32.70 \text{ ms}^{-1}$, $p < 0.01$) ทั้งนี้พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (Post-impact ball velocity, $n=5$) ณ จุดกระทบที่ 2. เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. เท่ากับ 44.436 ± 0.193 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) มีค่ามากที่สุด ดังตารางที่ 2. และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 5 ตำแหน่ง รองลงมาคือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ ทั้งนี้ความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสน้อยที่สุด สอดคล้องกับครอสส์ (Cross, 2006) ได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้โดยสร้างเฟรมอ้างอิงในการทดลอง (frame of reference) ในห้องปฏิบัติการเมื่อยึดไม้แร็กเกตให้หนึ่งอยู่กับ รายงานว่าจุดกระทบในการกระดอนของลูกเทนนิสจะน้อยที่สุด (dead spot) ซึ่งอยู่บริเวณใกล้ปลายของหัวไม้แร็กเกต

ทั้งนี้ชุดอุปกรณ์ความคุมลูกเทนนิส สามารถปล่อยลูกลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิสคล้ายกับการเสิร์ฟจริง โดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact ball velocity) ของไม้แร็กเกต RR ในตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 คือ 2.244 ± 0.235 , 2.612 ± 0.153 , 3.387 ± 0.273 , 3.523 ± 0.147 และ 3.391 ± 0.355 เมตรต่อวินาที มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยในการเสิร์ฟลูกแรกของโจวและคณะ (Chow et al., 2003) พบว่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยวและในประเภทหญิงเดี่ยวเท่ากับ 3.86 ms^{-1} และ 4.12 ms^{-1} เรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งทั้ง 5 จุดกระทบพบว่าค่าความเร็วลูกเทนนิสก่อนเข้ากระทบของแต่ละตำแหน่งมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ $p < 0.05$ ยกเว้นตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับตำแหน่งจุดกระทบที่ 5 (0, 30) ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เนื่องออกจากจุดกลางไปทางขวา ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพและขีดความสามารถของเครื่องมือที่มีความละเอียดเพียงพอ (sensitivity) ในการแยกแยะความแตกต่างของระยะห่างของแต่ละตำแหน่งจุดกระทบเพียง 30 มม เท่านั้น พบว่าค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบของรูปแบบโครงสร้างอีกสองรูปแบบ คือ RT และ RO มีข้อมูลดังกล่าวเช่นเดียวกัน ในขณะที่ค่าความเร็วของไม้แร็กเกต RR ก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ทั้ง 5 ตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ 30.903 ± 0.258 , 30.840 ± 0.267 , 30.823 ± 0.305 , 30.795 ± 0.266 และ 30.802 ± 0.298 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) เรียงตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานการวิจัยโจวและคณะ (Chow et al., 2003) เกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกแรก พบว่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยวและในประเภทหญิงเดี่ยวเท่ากับ 38.57 ms^{-1} และ 30.81 ms^{-1} เรียงตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ณ จุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่งของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง RR, RT และ RO เมื่อเปรียบเทียบกันมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการทดลองและควบคุมตัวแปรต่างๆของทั้งสามโครงสร้างได้ค่อนข้างดี

ในตารางที่ 2. แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆจากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในสามรูปแบบโครงสร้าง พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2. เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง เท่ากับ 44.436 ± 0.193 , 45.401 ± 0.211 และ 45.491 ± 0.199 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) เรียงตามลำดับ มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2. ของไม้แร็กเกต RO และ RT มีแนวโน้มมากกว่า RR แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างไม้ทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง น่าจะมาจากปัจจัยหลักสองประการคือ รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต และความตึงเอ็นบนหน้าไม้ที่เปลี่ยนแปลงหลังขึ้นเอ็นให้มีความตึงค่าเท่ากัน ทั้งนี้ในการศึกษาวิจัยมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถควบคุมความตึงเอ็นบนหน้าไม้ขณะที่ทดสอบทุกครั้งให้เท่ากันทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง เนื่องจากมีปัจจัยต่างๆที่แตกต่างกันข้างต้นแล้ว ขณะที่ลูกเทนนิสเข้ากระทบบนเอ็นหน้าไม้ทุกครั้งมีการลดลงของความตึงเอ็นบนหน้าไม้เทนนิสแต่ละ

โครงสร้างไม่เท่ากัน ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกการควบคุมตัวแปรการค่าความตึงเอ็นเท่ากันตั้งแต่เริ่มต้น พบอีกว่า ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ร่องลงมาจากรูปแบบที่ 2. คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต: เช่นเดียวกันทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง (43.701 ± 0.290 , 44.480 ± 0.287 และ 44.439 ± 0.297 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ) โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 3 ของไม้แร็กเกต RO มีแนวโน้มมากกว่า RT และ RR แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 1 มีค่าน้อยที่สุดเหมือนกันและใกล้เคียงกันมากทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง (43.482 ± 0.281 , 43.856 ± 0.280 และ 43.812 ± 0.390 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ)

ในตารางที่ 2. และรูปที่ 3. แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ (Smash ratio) ณ จุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่งของทั้งสาม รูปแบบโครงสร้างของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO พบว่าค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกตของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่าสูงสุด คือ 1.444 ± 0.011 , 1.469 ± 0.017 และ 1.472 ± 0.023 เรียงตามลำดับ ซึ่งไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ ระหว่างจุดกระทบที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับจุดกระทบที่ 1 ของแต่ละรูปแบบโครงสร้าง สอดคล้องกับภาสกร วัฒนาและคณะ (2548) ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟกับระดับความสูงบริเวณหน้าแร็กเกตที่กระทบกับลูกเทนนิส โดยจำลองการแข่งขัน แมทช์ประเภทชายเดี่ยวจากนักเทนนิสชายสังกัดลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทย พบว่านักเทนนิสทั้งสองคนเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 110 และ 89 ไมล์ต่อชั่วโมงตามลำดับ ระดับความสูงลูกเทนนิสขณะกระทบหน้าแร็กเกตทั้งลูกแรกและลูกที่สองเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20-22 นิ้ว เหนือจากบริเวณข้อมือขวา โดยลูกแรกจะอยู่สูงกว่าลูกที่สอง เฉลี่ยประมาณ 1 นิ้ว (ประมาณ 25.4 มม.) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างไม้แร็กเกต RR, RT และ RO พบว่าค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้ ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. ซึ่งมีค่าสูงสุดที่นั้น ไม้แร็กเกต RO และ RT มีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีแนวโน้มมากกว่าไม้แร็กเกต RR แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของทั้งสามโครงสร้าง ดังนั้นค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้ ร่องลงมาคือ ค่าอัตราส่วนเฉลี่ยจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (GSC) ของ RR, RT และ RO มีค่าเท่ากับ 1.415 ± 0.009 , 1.442 ± 0.012 และ 1.452 ± 0.016 เรียงตามลำดับ ใกล้เคียงกันกับจุดกระทบที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. และจุดกระทบที่ 5 ที่ยื่นออกจากจุดกลางไปทางขวา ยังพบอีกว่าค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต ณ จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าน้อยที่สุดทั้งสามโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกันมาก (1.406 ± 0.019 , 1.416 ± 0.012 และ 1.404 ± 0.025 เรียงตามลำดับ) ทั้งนี้คงเนื่องจากจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. หรืออยู่ตำแหน่งที่ใกล้ปลายขอบหัวไม้แร็กเกต จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบระหว่างเอ็นบนหน้าไม้แลลูกเทนนิส (e_a : apparent coefficient of restitution) ลดลงอย่างมาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีค่ามากที่สุดที่บริเวณกลางหน้าไม้แร็กเกต (Cross, 2002) อย่างไรก็ตามโครงสร้างไม้แร็กเกตรูปแบบวงรี RO ซึ่งค่าอัตราส่วนที่จุดกระทบที่ 2, 3, 4 และ 5 มีแนวโน้มสูงมากกว่า RR และ RT รวมถึงมีขนาดพื้นที่หน้าไม้เท่ากับ 98 ตารางนิ้ว มีค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต (stiffness = 63) และน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (swing weight = 327)

สูงสุด รวมถึงยังมีค่าน้ำหนักที่หัวไม้ของไม้แร็กเกต RO (balance =1) มากกว่าไม้แร็กเกตของ RR และ RT ด้วย ทั้งนี้มีความตึงของเอ็นบนหน้าไม้เป็นลำดับที่สอง (54.9 ปอนด์) หลังขึ้นความตึงเอ็นเท่ากัน น่าจะเป็นไม้แร็กเกตที่มีประสิทธิภาพดีกว่าสองรูปแบบโครงสร้าง

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังจากกระทบเอ็นบนหน้าไม้ในสามรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์คือ สีเหลือง (RR), สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลทโดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบจากสามรูปแบบโครงสร้าง พบว่าลูกเทนนิสที่ปล่อยลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิสคล้ายกับการเสิร์ฟจริง โดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO ก่อนกระทบทั้ง 5 ตำแหน่งมีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับตำแหน่งจุดกระทบ และมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ $p < 0.05$ ในแต่ละจุดกระทบ ยกเว้นจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับจุดกระทบที่ 5 (0, 30) ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เอียงออกจากจุดกลางไปทางขวา ในขณะที่ค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ณ จุดกระทบที่ 1 (0, 60) ของไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบโครงสร้างมีแนวโน้มมีค่ามากกว่าจุดกระทบอื่นๆ โดยค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในจุดกระทบที่ 3 (GSC) จากสามรูปแบบโครงสร้างมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันระหว่าง 30.816 - 30.884 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) ทั้งนี้ระดับความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในการทดลองนี้สามารถบ่งชี้ถึงการเสิร์ฟจริงของนักเทนนิสนานาชาติ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยโชว์และคณะ (Chow et al., 2003) แสดงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการทดลองทั้งเครื่องมืออุปกรณ์และควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ค่อนข้างดี

อย่างไรก็ตามพบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. ของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO เท่ากับ 44.436 ± 0.193 , 45.401 ± 0.211 และ 45.491 ± 0.199 เมตรต่อวินาที (ms^{-1}) เรียงตามลำดับ มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละตำแหน่งอื่นๆ ทั้ง 5 จุดกระทบของแต่ละรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต รองลงมาคือ ค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) เช่นเดียวกันทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง (43.701 ± 0.290 , 44.480 ± 0.287 และ 44.439 ± 0.297 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ) โดยมีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในตำแหน่งจุดกระทบที่ 1 มีค่าน้อยที่สุดเหมือนกันและมีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง (43.482 ± 0.281 , 43.856 ± 0.280 และ 43.812 ± 0.390 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ) ดังนั้นค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ (Smash ratio: $\text{ball}_{\text{post}} / \text{racket}_{\text{pre}}$) ของจุดกระทบที่ 2 ของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO มีค่าสูงที่สุดเช่นกัน (1.444 ± 0.011 , 1.469 ± 0.017 และ 1.472 ± 0.023 เรียงตามลำดับ) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเฉลี่ยดังกล่าว ณ จุดกระทบทั้ง 5 ของไม้แร็กเกตแต่ละโครงสร้าง พบว่ามีเพียงจุดกระทบที่ 1 กับจุดกระทบที่ 2 ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ โดยค่าเฉลี่ยอัตราส่วนรองลงมาคือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (1.415 ± 0.009 , 1.442 ± 0.012 และ 1.452 ± 0.016 เรียงตามลำดับ) ซึ่งใกล้เคียงกันกับจุดกระทบที่ 4 ได้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. และจุดกระทบที่ 5 ที่เอียงออกจากจุดกลางไปทางขวา พบอีกว่าค่าอัตราส่วนเฉลี่ยไม้แร็กเกต ณ จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าน้อยที่สุดของทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง (1.406 ± 0.019 , 1.416 ± 0.012 และ 1.404 ± 0.025 เรียงตามลำดับ) มีค่าใกล้เคียงกันมาก

สรุปผลการศึกษาค้นคว้าเปรียบเทียบจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ทั้ง 5 ตำแหน่ง พบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้างของไม้แร็กเกตมีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ จากจุดกระทบอื่นๆที่เหลืออีก 4 ตำแหน่งของแต่ละโครงสร้าง ทั้งนี้สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ (Smash ratio) ที่แสดงประสิทธิภาพของแต่ละตำแหน่งของจุดกระทบ ซึ่งค่าเฉลี่ยอัตราส่วน ณ จุดกระทบที่ 2 ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้างยังคงมีค่ามากที่สุดเช่นกัน ทั้งนี้พบว่าโครงสร้างไม้แร็กเกตรูปแบบวงรี RO ค่าอัตราส่วนที่จุดกระทบตำแหน่งที่ 2, 3, 4 และ 5 มีแนวโน้มสูงมากกว่า RR และ RT รวมถึงมีค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกตและค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้สูงสุด มีค่าน้ำหนักที่หัวไม้ของไม้แร็กเกตมากกว่า และมีค่าความตึงของเอ็นบนหน้าไม้เป็นลำดับที่สองหลังขึ้นความตึงเอ็นเท่ากัน น่าจะเป็นไม้แร็กเกตที่มีประสิทธิภาพดีกว่าสองรูปแบบโครงสร้างที่เหลือ ทั้งนี้จะเป็นประโยชน์ทำให้นักเทนนิสสามารถเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตได้ตรงตามที่ต้องการ เพื่อให้เสิร์ฟลูกให้เกิดประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการเสิร์ฟลูกแรกที่ทำให้เกิดความเร็วที่สูงสุดและรุนแรง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการสร้างความได้เปรียบทางการกีฬาอย่างถูกต้องตามกติกาและจริยธรรม

เอกสารอ้างอิง

1. Allen, T.B., Haake, S.J. & Goodwill, S.R. (2011). Effect of tennis racket parameters on simulated groundstroke. *Journal of Sports Science* 29 (3): 311-325.
2. Brody H., Cross R. (2002) Serve speed. Theory, motion and strategy. IN: Howard B, Cross R, Lindsey C(eds) *The physics and technology of Tennis*. Solana Beach racquet tech USRSA, 201-207.
3. Chow, J., Carton, L., Lim Y.T., Chae, W.S., Shim, J.H., Kuenster, A. & Kokubum, K. (2003). Comparing the pre- and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis player' first and second serves: a preliminary study, *Journal of Sports Science* 21(1), 529-537.
4. Choppin, S.B. (2013). An investigation into the power point in tennis.. *Journal of Sports Engineering* 16: 173-180.
5. Cross, R. (1998). The sweet spots of a tennis racquet. *Journal of Sports Engineering* 1, 63-78.
6. Cross R. (2006) "Tennis Racquet Physics." University of Sydney. Feb. 2, 2006. Accessed March 17, 2006. <http://www.physics.usyd.edu.au/~cross/tennis.html>.
7. Cross R, Pollard G. (2009) Grand slam men's singles tennis 1991-2009 serve speeds and other related data. *ITF coaching and sport science review* , 16, (49): 8-10
8. Donoghue PO, Ballantyne A. (2004) "The impact of speed of service in Grand Slam single tennis. In : Lees A, Kahn JF, Maynard IW (eds) *Science and Racket Sports III The Proceeding of the Eighth international Table Tennis Federation Sports Science Congress and the Third World Congress of Science and Racket Sports* Oxon Routledge Taylor & Francis Group, 179-184.

9. Haake, S.J., Allen, T.B., Choppin, S.B. & Goodwill, S.R. (2007). The evolution of the tennis racket and its effect on serve speed. In S. Miller & J. Capel-Davies (Eds.), *Tennis science and technology 3: Proceedings of the III International Conference on Tennis Science and Technology* (pp. 257–271). London: International Tennis Federation.
10. ITF TECHNICAL DEPARTMENT. (2009) International Tennis Federation (online). Last accessed on 01/03/2009 at URL: www.itftennis.com/technical.
11. Trabert T., Hook J. (1984). *The Serve: Key to Winning Tennis*. New York: Dodd, Mead & Co.
12. ภาสกร วัฒนธาดา, ปาจารย์ ศรีสมบัติ, สมพล สงวนรังศิริกุล และสุวัตร สิทธิหล่อ. 2548. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟกับระดับความสูงบริเวณหน้าแร็กเก็ตที่กระทบกับลูกเทนนิส. *Sports Sci. Technol.* 5(1, 2):1-12.
13. ศิลปชัย สุวรรณธาดา. 2552. การศึกษาปัจจัยความสำเร็จของชนิดกีฬาที่เป็นความหวังของประเทศไทยในกีฬาเทนนิส รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: การกีฬาแห่งประเทศไทย ร่วมกับสำนักวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย