

การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุด  
ในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ของนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ



นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬา

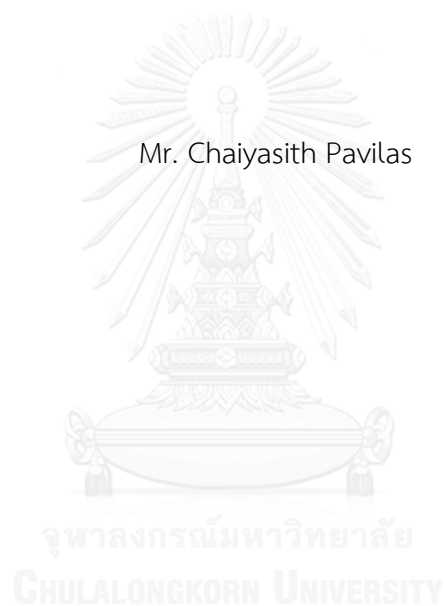
คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON IMPACT MODEL OF TENNIS FLAT SERVE AT RACKET'S MAXIMUM BALL  
SPEED SPOT IN NATIONAL YOUTH MALE PLAYERS

Mr. Chaiyasith Pavilas



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Sports Science  
Faculty of Sports Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแบล็กของ นักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ
โดย	นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การกีฬา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม ชัยวัชราภรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิลปชัย สุวรรณธาดา

---

คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ชัย อินทิตราภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ชัย อินทิตราภรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม ชัยวัชราภรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิลปชัย สุวรรณธาดา)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย บุญรอด)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพัฒน์ หล่อศิริรัตน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราตรี เรืองไทย)

ชัยสิทธิ์ ภาวิลาส : การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแพลท์ของนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ (A STUDY ON IMPACT MODEL OF TENNIS FLAT SERVE AT RACKET'S MAXIMUM BALLSPEED SPOT IN NATIONAL YOUTH MALE PLAYERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.เฉลิม ชัยวัชรารณณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ศิลปชัย สุวรรณธาดา, 127 หน้า.

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโมเดลที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส (predictive impact model) ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกด้วยการวิเคราะห์ภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ จากการเสิร์ฟลูกแพลท์ของนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาถึงอัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกแพลท์ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำข้อมูลตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (Smash ratio) มาประกอบรวมในการสร้างโมเดลสมการถดถอยในขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากเป็นข้อจำกัดในการวิจัย ซึ่งเป็นการศึกษาโมเดลที่ได้จากประสบการณ์ในสภาวะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) จึงสามารถนำมาใช้อธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยตรง

ผลการวิจัยขั้นต้นแรก ในสามรูปแบบโครงสร้าง พบว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่าสูงที่สุด โดยค่าอัตราส่วนนี้ (Smash ratio) มีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 1.811 ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราส่วนในสามรูปแบบโครงสร้าง (RR สี่เหลี่ยม, RT สามเหลี่ยม และ RO วงรี) พบว่าค่าอัตราส่วนของสามโครงสร้าง ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างจากตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าอัตราส่วนนี้ระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ

ผลการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ จากกล้องวิดีโอความเร็วสูง ในการเสิร์ฟลูกแรกจากนักกีฬาเยาวชนทีมชาติ จำนวน 167 ผลการทดสอบ นำมาวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน (Multiple Regression; Stepwise) พบว่า ความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ( $Racket\ Velocity_{pre}$ ) เป็นตัวแปรอิสระแรกที่ทำนายทางบวก ต่อค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ( $Ball\ Velocity_{post}$ ) มีอิทธิพลมากที่สุด ร้อยละ 76.2 ( $\beta = .762$ ) รองลงมาคือค่าอัตราส่วน (Smash ratio) ทำให้มีผลเพิ่มขึ้น ( $\beta = .671$ ) ซึ่งเป็นปัจจัยด้านทักษะเทคนิคเฉพาะบุคคล ทั้งนี้ค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต ( $Racket\ stiffness$ ) ทำให้ค่าเพิ่มขึ้น ( $\beta = .564$ ) เช่นกัน แต่ความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension) มีผลในทางตรงกันข้ามที่ทำให้ค่าลดลง ( $\beta = -.329$ ) ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนายที่ปรับเทียบ (Adjusted  $R^2$ ) แสดงถึงตัวแปรอิสระทั้งสี่ตัวแปรที่ใช้ทำนายความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก ร้อยละ 89.8 [สมการ predictive impact model;  $Ball\ Velocity_{post} = -25.978 + .970 (Racket\ Velocity_{pre}) + 86.223 (Smash\ ratio) + .270 (Racket_{stiffness}) - .840 (String\ tension)$ ]

จากผลงานวิจัยนี้ สรุปได้ว่า โมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก จากรูปแบบโครงสร้างรวม น่าจะใช้ทำนายความเร็วของลูกเทนนิส ระดับที่ดี (ร้อยละ 89) โดยจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ณ ตำแหน่ง 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. น่าจะสร้างอัตราเร็วของลูกเทนนิส (Ball speed) ได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงสุด

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์การกีฬา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5478603139 : MAJOR SPORTS SCIENCE

KEYWORDS: TENNIS FLAT FIRST SERVE / BALL SPEED / RACKET VELOCITY / PREDICTIVE IMPACT MODEL

CHAIYASITH PAVILAS: A STUDY ON IMPACT MODEL OF TENNIS FLAT SERVE AT RACKET'S MAXIMUM BALLSPEED SPOT IN NATIONAL YOUTH MALE PLAYERS. ADVISOR: ASST. PROF.CHALERM CHAIWATCHARAPORN, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF.SILPACHAI SUWANTHADA, Ph.D., 127 pp.

This research aimed to determine predictive impact model of tennis flat first serve by Thai national junior players, including an independent variable as smash ratio using a real strike simulating machine in laboratory. The research study was divided into 2 studies. Study-1 focused on ball-racket interaction of flat serve at instance Pre-inbound and Post-outbound at afore-mentioned impact locations as well as smash ratios by 3R-racket typing. The results showed that smash ratio ( $\text{ball}_{\text{post}}/\text{racket}_{\text{pre}}$ ) at P2 was 1.811 % higher than that of Geometric stringbed center (GSC) referred, indicating the highest ratio occurred at location P2 (0, 30), impact location 30 mm distance above GSC of racket face ( $p < 0.05$  level of significance) as power spot that was shown to produce maximum ball outbound velocity. Moreover, the smash ratio at P1, P2 and P3 were shown significance difference from the others (P4 and P5) in 3 structural racket frames, but no significance difference in each racket typing.

The predictive impact model of tennis first serve was developed by 167 serving trails in 3D-motion analysis, high speed camera 2,000 Hz with also using in study 1, via Thai national junior players in study 2. Data was analyzed by Stepwise Multiple Regression analysis. The results showed that Post impact ball velocity ( $\text{Ball Velocity}_{\text{post}}$ ) was significantly different from four predictors ( $F = 668.019$ ) at  $p < 0.05$ . Moreover, Pre impact ball velocity ( $\text{Racket Velocity}_{\text{pre}}$ ) was significantly high predict  $\text{Ball Velocity}_{\text{post}}$  as expected 76.2 percent ( $\beta = .762$ ), including the smash ratio about 67.1 ( $\beta = .671$ ) indicated that tennis player's performance could be the major effects of ball speed. While, stiffness of racket ( $\text{Racket}_{\text{stiffness}}$ ;  $\beta = .564$ ) and string tension ( $\beta = -.329$ ) were also significantly predict  $\text{Ball Velocity}_{\text{post}}$  of tennis racket characteristics were the minor effects of ball speed, but swing weight of racket may be not.

Conclusion, this predictive impact model of tennis first serve [ $\text{Ball Velocity}_{\text{post}} = -25.978 + .970 (\text{Racket Velocity}_{\text{pre}}) + 86.223 (\text{Smash ratio}) + .270 (\text{Racket}_{\text{stiffness}}) - .840 (\text{String tension})$ ] via Thai national junior players was predicted approximately 89.8 percent ( $\text{Adjusted } R^2 = .898$ ). This implies that concept of power spot (smash ratio) at location P2 (0, 30), impact location 30 mm distance above GSC, could be utilized to maximum effectively customizes a tennis player's typical first serve style as previous studies.

Field of Study: Sports Science  
Academic Year: 2014

Student's Signature .....  
Advisor's Signature .....  
Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนและความช่วยเหลือจากหน่วยงานและบุคลากรจากหลายฝ่าย ไม่ว่าจะเป็นเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิจัย คำแนะนำที่มีประโยชน์ ซึ่งถือเป็นปัจจัยเกื้อหนุนสำคัญต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ที่ไม่อาจละเลยไม่กล่าวถึง ณ ที่นี้ได้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.เฉลิม ชัยวัชรารมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำ ช่วยเหลือเรื่องการส่งตีพิมพ์ในวารสาร และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในระหว่างการดำเนินการวิจัย ผศ.ดร. ชรินทร์ชัย อินทรารมณ์ ประธานคณะกรรมการสอบ ผศ.ดร. ศิลป์ชัย สุวรรณธาดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูลและการชี้แจงรายละเอียดต่อคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย ผศ.ดร. ชรินทร์ชัย อินทรารมณ์ สำหรับความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมืออุปกรณ์ และสนามกีฬาเทนนิส ที่ในการเก็บข้อมูลการวิจัย ผศ.ดร. วันชัย บุญรอด ผศ.ดร. ชัยพัฒน์ หล่อศิริรัตน์ และ ผศ.ดร. ราตรี เรืองไทย คณะกรรมการที่กรุณาตรวจสอบข้อมูลรายละเอียดของเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้เข้าร่วมการวิจัยทุกท่านที่อุทิศแรง และเวลามาร่วมการทดสอบจนทำให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับการอำนวยความสะดวกจากเจ้าหน้าที่ในศูนย์ทดสอบ วิจัย วัสดุและอุปกรณ์การกีฬา และจากเจ้าหน้าที่ของคณะวิทยาศาสตร์การกีฬาทุกท่าน ด้วยดีตลอดมา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาเฉพาะค่าเล่าเรียน จากบัณฑิตวิทยาลัย และคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” จากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมถึงการกีฬาแห่งประเทศไทยทุกท่าน

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	4
คำถามของการวิจัย.....	4
สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
ขอบเขตการวิจัย.....	5
คำจำกัดความของการวิจัย.....	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
วิทยาศาสตร์การกีฬาสำหรับกีฬาเทนนิส.....	8
1) สรีรวิทยาการกีฬา (Sports Physiology).....	10
1.1) ความสามารถทางการเคลื่อนไหว (Motor Ability).....	10
1.2) การฝึกความเร็วทางตรง (Linear Speed Drill).....	11
1.3) การฝึกความเร็วทางด้านข้าง (Lateral Speed Drill).....	12
1.4) การฝึกเกิน (Overtraining).....	12
2) ชีวกลศาสตร์การกีฬา (Sports Biomechanics).....	12

2.1) การหมุน (Spin) ของลูกเทนนิส .....	12
2.2) วิธีสร้างความแรงในการตีโฟร์แฮนด์และแบ็คแฮนด์.....	13
2.3) การบิดของหน้าไม้.....	14
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา (Sports Engineering and Technology).....	14
1) รูปแบบโครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์ .....	14
2) วัสดุและน้ำหนัก (Racket materials) .....	14
3) ความแข็งแรงของไม้แร็กเกต (Stiffness of racket).....	15
4) เส้นเอ็น (String).....	15
5) ลูกเทนนิส (Tennis Ball).....	16
7) เทคโนโลยีในการถ่ายทอดการแข่งขัน (Sports Media Technology).....	16
องค์ประกอบที่สำคัญของนักเทนนิสชั้นยอด.....	17
ปัจจัยความสำเร็จในการเสิร์ฟลูกเทนนิสและโมเดล .....	20
โมเดลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้านวิศวกรรมศาสตร์การกีฬา (Model in Sports Engineering).....	23
โมเดลที่นำมาใช้งานด้านเทคโนโลยีการกีฬาในกีฬาเทนนิส (Model in Sports Technology)...	24
กรอบแนวคิดในการวิจัย .....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
ขั้นตอนที่ 1.....	31
กลุ่มตัวอย่าง.....	31
เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเข้าร่วมการวิจัย .....	31
เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างออกจากกรวิจัย.....	32
ขั้นตอนในการวิจัย.....	32
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	37



เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	38
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	38
ขั้นตอนที่ 2.....	39
กลุ่มตัวอย่าง.....	39
เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเข้าร่วมการวิจัย .....	39
เกณฑ์การคัดเลือกออกจากการวิจัย.....	40
วิธีดำเนินการและขั้นตอนในการวิจัย .....	40
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	45
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	45
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 1.....	48
1) ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR ผลัดกันที่ไม่เรียงเกิด แรกเพื่อพิสูจน์หาตำแหน่งจุดกระทบที่มีความเร็วของลูกเทนนิสสูงสุด .....	48
2) อภิปรายผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR.....	57
3) สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR.....	60
4) ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ใน 3 รูปแบบโครงสร้างผลัดกัน (RR, RT และRO) เพื่อพิสูจน์ความแตกต่างใน 3 รูปแบบโครงสร้างไม่เรียงเกิด เพื่อสร้างโมเดล .....	62
5) อภิปรายผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ใน 3 รูปแบบโครงสร้าง .....	69
6) สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ใน 3 รูปแบบโครงสร้าง .....	72
ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2.....	74
1) ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 2 การสร้างโมเดลสมการถดถอย เพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุด กระทบบน เ็นหน้าไม้เรียงเกิดที่ทำให้เกิดความเร็วยุติสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟ ลูกแรก .....	74

2) สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 2 การสร้างโมเดลสมการถดถอย เพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	88
สรุปผลการวิจัย.....	88
อภิปรายผล.....	91
ข้อจำกัดในการวิจัย.....	106
ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป .....	106
รายการอ้างอิง .....	107
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก .....	111
1) แบบตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ 3 มิติ จากไม้แร็กเกตอันแรกของนักกีฬา Subject-RR1 ในแต่ละตำแหน่ง.....	111
2) ตัวอย่างตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ จากไม้แร็กเกตอันแรกของนักกีฬา จำนวน 6 คน (RR1, RR2, RT1, RT2, RO1, RO2) และเป็นข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ทางสถิติ (SPSS/PC) ในรอบแรก .....	112
3) ตัวอย่างข้อมูลดิบผลการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ 3 มิติจากไม้แร็กเกตรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR ตำแหน่งจุดกระทบที่ 1 .....	113
ภาคผนวก ข .....	114
1) รูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตและลูกเทนนิส/รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดลองวิจัย.....	114
2) คุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ .....	115
3) การติดตั้งชุดเครื่องมือวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ ณ สนามกีฬาเทนนิส คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	116
4) เครื่องวัดคุณสมบัติในการกระด้างของลูกเทนนิส.....	118

ภาคผนวก ค .....	119
1) เอกสารประกอบการขออนุมัติโครงสร้างวิทยานิพนธ์และขอจริยธรรมการวิจัย .....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	127



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกต RR คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket) และความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball) ในแต่ละจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง (mean+SD) รวมถึงแสดงค่าอัตราเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 450 rpm ..... 55
ตารางที่ 2	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง (RR, RT และ RO) คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball), ความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket) และอัตราเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ในแต่ละจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง (mean+SD) รวมถึงอัตราเฉลี่ยรวมสามไม้แร็กเกต (3R) โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการกำหนดความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 450 rpm..... 63
ตารางที่ 3	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง และจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง ของค่าเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball)..... 64
ตารางที่ 4	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง และจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง ของค่าเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of ball) ..... 65
ตารางที่ 5	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง และจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง ในอัตราเฉลี่ย

	ความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Ball <sub>post</sub> /Racket <sub>pre</sub> ).....	67
ตารางที่ 6	แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ 3 รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต (สี่เหลี่ยม; RR , สามเหลี่ยม; RT และวงรี; RO) จากนักเทนนิสเยาวชนทีมชาติทั้ง 3 กลุ่มที่เข้าร่วมการวิจัยรวม 6 คน โดยนักกีฬาแต่ละบุคคลใช้ไม้แร็กเกตของตนเอง (ไม้แร็กเกตยี่ห้อเดียวกับไม้แร็กเกตเดิมที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1 ดังตารางที่ 3 รวม 2 อัน) แหล่งข้อมูลมาตรฐานเทียบตาม RDC Unit (Babolat Racket Diagnostic Center) .....	75
ตารางที่ 7	แสดงผลการวิเคราะห์ภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีในทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสจากนักเทนนิสเยาวชนทีมชาติรวม 3 กลุ่ม ที่เสิร์ฟตรงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตในแต่ละจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง (mean) โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกต 3 รูปแบบโครงสร้าง (สี่เหลี่ยม; RR , สามเหลี่ยม; RT และวงรี; RO) จำนวน 167 ผลการวิเคราะห์สามมิติ (b) จาก 253 ผลการทดสอบ (a) โดยนักกีฬาแต่ละบุคคลใช้ไม้แร็กเกตยี่ห้อเดียวกัน 2 อัน (ของนักกีฬาเองและไม้แร็กเกตเดิมที่ใช้ทดลองในขั้นตอนแรก) .....	77
ตารางที่ 8	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรอิสระทั้งห้าตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม รวมถึงการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรอิสระรวม ( $n = 167$ ) ด้วยวิธีทดสอบค่าเอฟ (F-test) .....	82
ตารางที่ 9	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนดิบ ( $B$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ( $SE$ ), ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนมาตรฐาน ( $\beta$ ) และค่าที่ ( $t$ ) ของตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม จากโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก ( $n = 167$ ).....	83
ตารางที่ 10	แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ ( $R$ ) ค่ากำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณ ( $R$ Square; $R^2$ ) ค่ากำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณที่ปรับเทียบ (Adjusted $R^2$ ) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ( $SE$ ) ของสัมประสิทธิ์ถดถอยจากโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก .....	84

- ตารางที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเชื่อมั่นของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบค่าคะแนนดิบ ( $B$ ) สำหรับตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรที่ใช้ทำนายตัวแปรตาม รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlations) และค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เชิงเส้นร่วม (collinearity) จากโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดใน การเสิร์ฟลูกแรก ( $n^{\#}=167$ )..... 85
- ตารางที่ 12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากคอมพิวเตอร์ ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณจากโมเดลที่ใช้ห้องปฏิบัติการ (Tennis GUT-ITF: Haake et al., 2007)..... 101



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1	แสดงองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์การกีฬาทั้ง 7 สาขา ที่นำมาพัฒนาการฝึกซ้อมกีฬา เปรียบเสมือนเป็นเสาหลักที่เชื่อมโยงกับระบบต่างๆ จากบ้านนักกีฬาเพื่อความเป็นเลิศ (House of Sport Excellence).....	9
รูปที่ 2	แสดงลักษณะการตกกระทบของลูกเทนนิสถึงพื้นและการกระเด็นขึ้น .....	13
รูปที่ 3	แสดงวิธีสร้างความแรงในการตีโฟร์แฮนด์และแบ็คแฮนด์ .....	13
รูปที่ 4	แสดงโครงสร้างของหน้าไม้แร็กเกตแต่ละยี่ห้อ หรือผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน .....	15
รูปที่ 5	แสดงค่าตัวแปรสำคัญต่างๆที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความเร็วของลูกเทนนิสหลัง เข้ากระทบ (Haake et al., 2007) .....	22
รูปที่ 6	แสดงตำแหน่งจุดกระทบต่างๆบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration node) ในขณะออกแรงตีที่ตรงกลางหน้าไม้ และจุดกระทบในการกระเด็นของลูก เทนนิสมากที่สุด (best bounce) ในห้องปฏิบัติการ (Cross, 2006).....	25
รูปที่ 7	แสดงวิธีการยึดไม้แร็กเกตแบบใหม่ที่ปลายหัวไม้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาโมเดล รูปแบบการเข้ากระทบบนหน้าไม้ในการตีลูกโฟร์แฮนด์ แบบ 3 มิติ จากนักกีฬาและผล การทดลองในห้องปฏิบัติการ (Choppin, 2008).....	26
รูปที่ 8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลูกเทนนิส (Outbound ball speed) ระยะห่าง ของจุดหมุนไม้แร็กเกต (Distance from COM) และความเร็วที่เข้ากระทบ (Impact speed) เพื่อคำนวณหาความเร็วลูกสูงสุด (Power point) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลง เคลื่อนที่ ตามค่าความเร็วของหน้าไม้แร็กเกต (Choppin, 2013) .....	28
รูปที่ 9	แสดงรูปแบบโครงสร้างของหน้าไม้แร็กเกตในแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นตัวแทนในการ วิจัย ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันไป อาทิเช่น รูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม (RR) ใช้ Yonex: VCORE 95D.....	32
รูปที่ 10	เครื่องจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบเทนนิสภายในห้องปฏิบัติการ (Flat serve via strike simulating machine) ประกอบด้วยมอเตอร์ (5 HP servo-motor) และชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ พร้อมกล้องความเร็วสูง จำนวน 2 ตัว เก็บข้อมูลทดลองจากการตีตั่งไม้แร็กเกตกับแท่นแขนเหวี่ยง โดย (a) กล้องความเร็ว	

- สูงตัวที่ 1 จับภาพด้านหน้า (front view with camera-1) และ (b) กล้องความเร็วสูงตัวที่ 2 ด้านข้าง (Side view with camera-2)..... 34
- รูปที่ 11 การปรับเทียบตำแหน่งมาตรฐาน (Calibration) ก่อนเก็บข้อมูล โดยติดตัวสะท้อนแสง (marker) ระยะห่างระหว่างแกน 0.5 เมตร รวม 15 จุด (Calibration frame of 0.5 x 0.5 x 0.5 m with 15 markers) โดย (a) จากกล้องความเร็วสูงตัวที่ 1 จับภาพด้านหน้า (front view), (b) กล้องความเร็วสูงตัวที่ 2 ด้านข้าง (Side view) และ (c) จอแสดงภาพ (computer screen display)..... 35
- รูปที่ 12 แสดงตำแหน่งจุดกระทบที่แตกต่างกันทั้ง 5 คือ ตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ แร็กเกต 60 มม. (Short axis= 0, Long axis =60), ตำแหน่งที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30), ตำแหน่งที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (0, 0: Geometric String-bed Center-GSC), ตำแหน่งที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม.(0, -30) และตำแหน่ง 5 เยื้องออกไปทางขวา 30 มม. (30, 0) ตามรูปภาพ..... 36
- รูปที่ 13 การติดตั้งชุดเครื่องมือวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ ณ สนามกีฬาเทนนิส คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (a) ภาพแสดงตำแหน่งกล้องความเร็วสูง ตำแหน่งนักกีฬาเสิร์ฟ ตำแหน่งกล้องความเร็วสูง 2 ตัวอยู่ในแนวด้านหลังนักกีฬา และพื้นที่เป้าหมายในสนามเทนนิส (T= color) ที่กำหนดไว้ (b) ผู้ฝึกสอนชี้แจงให้นักกีฬาทำการเสิร์ฟลูกเทนนิสแบบเสิร์ฟลูกแรกให้แรงและเร็วที่สุด และ (c) ภาพแสดงการปรับเทียบมาตรฐานก่อนการทดสอบ (บนซ้าย), การวิเคราะห์ภาพในขณะเสิร์ฟ (บนขวา), การวัดความตึงของเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตก่อนการทดสอบ (ล่างซ้าย) และปากกาสีชนิดพิเศษแต้มบริเวณเอ็นบนหน้าไม้ และติดตัวสะท้อนแสงชนิดแถบเทปที่บริเวณไม้แร็กเกต (ล่างขวา)..... 44
- รูปที่ 14 แสดงวิธีในการวิเคราะห์ภาพที่มีความเที่ยงตรงและถูกต้อง (precise and accurate tracking) ขณะลูกเทนนิสเข้ากระทบเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตรูปแบบโครงสร้าง RR ณ ตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) ด้วยชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ โดย (a) ภาพก่อนที่ลูกเคลื่อนเข้ากระทบเอ็น (ball inbound), (b) ภาพที่ 4 ขณะเข้ากระทบเต็มลูก (at the 4<sup>th</sup> frame of ball inbound) และ (c) ภาพที่ 8 การเริ่มเคลื่อนที่ของลูกออกจากหน้าไม้แร็กเกต ..... 50
- รูปที่ 15 แสดงรูปกราฟค่าอัตราเร่งและค่าความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด (acceleration and maximum velocity of ball) หลังกระทบหน้าไม้แร็กเกต RR ณ จุดกระทบตำแหน่ง



- ที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. เรียงตามลำดับ [รูปภาพบน: 15 (a)] รวมถึงความเร็วตำแหน่งปลายหัวไม้ (top: M1) และต่ำสุด (bottom: M2) [รูปภาพล่าง: 15 (b)] ซึ่งแสดงถึงค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบ โดยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบเทนนิสในห้องปฏิบัติการ..... 51
- รูปที่ 16 แสดงตำแหน่งจุดกระทบและรูปกราฟอัตราเร่งและความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด (acceleration and maximum velocity of ball) หลังกระทบหน้าไม้แรกเกิด RR ณ จุดกระทบตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (P1; 0, 60 รูปภาพแรก), จุดกระทบที่ 2 (P2; 0, 30), จุดกระทบที่ 3 (P3-GSC; 0, 0), จุดกระทบที่ 4 (P4; 0, -30) และจุดกระทบที่ 5 (P5; 30, 0) เรียงตามลำดับ โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ ..... 54
- รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบกราฟค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แรกเกิดก่อนกระทบ (Smash ratio:  $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) ทั้ง 5 ตำแหน่งจุดกระทบ ในรูปแบบโครงสร้าง RR โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 450 rpm..... 56
- รูปที่ 18 แสดงกราฟค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แรกเกิดก่อนกระทบ (Smash ratio:  $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบใน 3 รูปแบบโครงสร้าง (RR, RT และ RO) ทั้ง 5 ตำแหน่งจุดกระทบ รวมถึงค่าอัตราส่วนเฉลี่ยรวมสามไม้แรกเกิด (3R: mean+SD) โดยจุดกระทบที่ 2 (0, 30) เหนือจุดกลาง 30 มม. มีค่าสูงที่สุดเช่นเดียวกัน โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ ..... 67
- รูปที่ 19 แสดงรูปกราฟอัตราเร่งและความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด (acceleration and maximum velocity of ball) หลังกระทบหน้าไม้แรกเกิด RR ณ ณ จุดกระทบตำแหน่งที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (GSC) จากการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ (รูปภาพด้านซ้าย จากกล้องตัวที่ 1 และด้านขวาจากกล้องตัวที่ 2) โดย (a) กราฟแสดงความเร็วลูกเทนนิสในภาพที่ 4 (ด้านซ้าย) ขณะหน้าไม้แรกเกิดเข้ากระทบเต็มลูก (4<sup>th</sup> frame of ball inbound: No-333), (b) กราฟแสดงความเร็วลูกเทนนิสในภาพที่ 9 (No-338) การเริ่มเคลื่อนที่ของลูกออกจากเอ็นบนหน้าไม้จังหวะแรก และ (c) กราฟแสดงความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดในขณะที่ลูกเคลื่อนที่ออกจากเอ็นบนหน้าไม้แล้วสี่ภาพ (No-342) จากการเสิร์ฟลูกแรกของนักกีฬาเยาวชนทีมชาติในสนามเทนนิส..... 81

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ประเทศต่างๆ ได้อาศัยเวทีการแข่งขันกีฬาระดับนานาชาติ เป็นเวทีแสดงศักยภาพทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ดังจะเห็นได้ว่าตารางเหรียญรางวัลในการแข่งขันโอลิมปิก ทั้งสิบอันดับแรกมักจะตกเป็นของประเทศที่พัฒนาแล้ว หรือประเทศที่มีศักยภาพสูงและต้องการการลงทุนอย่างมหาศาล ถนนมวงค์ กฤษณ์เพ็ชร และคณะ (2552) รายงานว่า กีฬา นอกจากเป็นการแสดงศักยภาพด้านทรัพยากรบุคคลของประเทศไทยไปสู่นานาชาติ ยังเป็นการสร้างความสุขให้แก่คนไทยทั้งชาติ รวมไปถึงการสร้างแบบอย่างที่ดีแก่เยาวชนของประเทศ จากวิโรจน์กีฬาผู้สร้างชื่อเสียงจากความสำเร็จในการแข่งขันกีฬาระดับนานาชาติ ความสำเร็จของนักกีฬาในปัจจุบันประกอบด้วยองค์ประกอบหลายอย่าง เนื่องด้วยวิทยาการและเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก การฝึกนักกีฬาแบบเดิมๆ จึงไม่สามารถผลิตนักกีฬาที่จะประสบความสำเร็จระดับโลกได้อีกต่อไป ประเทศที่พัฒนาแล้วและประสบความสำเร็จในเวทีการแข่งขันกีฬาระดับนานาชาติต่างอาศัย “วิทยาศาสตร์การกีฬา” เป็นตัวจักรสำคัญในการพัฒนานักกีฬาของประเทศของตนขึ้นมา วิทยาศาสตร์การกีฬา ประกอบไปด้วย 6 ศาสตร์ที่สำคัญมาก และจำเป็นต่อการพัฒนานักกีฬา ได้แก่ สรีรวิทยาการกีฬา ชีวกลศาสตร์การกีฬา เวชศาสตร์การกีฬา จิตวิทยาการกีฬา โภชนาการกีฬา รวมถึงวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา ซึ่งหมายถึง ศาสตร์ที่ว่าด้วยการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยในการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือ สนามกีฬา ตลอดจนอุปกรณ์กีฬาส่วนบุคคลต่างๆ ที่นักกีฬานำไปใช้ในการแข่งขัน อาทิเช่น การเลือกวัสดุผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์กีฬาไม้แรกเกิด เป็นต้น เพื่อเพิ่มศักยภาพสร้างความได้เปรียบทางการกีฬา ทั้งระหว่างการแข่งขันและในขณะแข่งขันกีฬา ในศาสตร์ที่ 7

อดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีของอุปกรณ์ไม้แรกเกิดเทนนิสเป็นอย่างมาก นับตั้งแต่หน้านักจนถึงรูปร่างของไม้แรกเกิด เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับนักกีฬาที่จะเลือกใช้ไม้แรกเกิด ศิลปชัย สุวรรณธาดา (2552) กล่าวว่า ในปี ค.ศ.1976 เฮอวาร์ดเฮดได้เริ่มต้นพัฒนาหน้าไม้แรกเกิดให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ช่วยให้นักเทนนิสทั่วไปเล่นเทนนิสได้ง่ายและสนุกสนานมากขึ้น เนื่องจากหน้าไม้มีจุดกระทบที่ทำให้เกิดความเร็วสูง (sweet spot) มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดหน้าไม้แรกเกิดในปัจจุบันจำแนกเป็นหน้าไม้ขนาด mid, ขนาด mid-plus, ขนาด oversized และหน้าไม้ super-oversized มีพื้นที่มากกว่า 122 ตารางนิ้ว นอกเหนือจากขนาดของหน้าไม้แล้ว จุดสมดุลและขนาดของกริพ หรือด้ามจับไม้เทนนิสก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย จุดสมดุลของไม้เปลี่ยนแปลงตามความพึงพอใจของนักเทนนิส และขึ้นอยู่กับสไตล์การเล่นด้วย มีการเลือกระหว่างไม้หัวหนักและไม้หัวเบา เนื่องจากไม้หัวหนักช่วยเพิ่มพลังในการเสิร์ฟและการตีลูกกระดอน ส่วนไม้หัวเบาช่วยในการควบคุม

การตี ขนาดของกริฟ ก็มีผลต่อการเล่นและการแข่งขันเช่นเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเฉพาะของนักเทนนิสแต่ละคน รวมถึงวัสดุต่างๆ ของไม้แร็กเกต ในสมัยแรกทำด้วยไม้ ซึ่งเกิดปัญหาความไม่แน่นอน ต่อมาบริษัทผลิตไม้แร็กเกตได้ทดลองนำเอาวัสดุโลหะมาใช้ เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม ไททานเนียม ต่อมาหลายบริษัทได้ทดลองใช้วัสดุโบรอน เซรามิกกราไฟท์ และวัสดุผสม วัสดุแต่ละอย่างมีคุณสมบัติเฉพาะตัว แต่ไม้แร็กเกตที่ทำจากเซรามิกและกราไฟท์ ได้รับเลือกเป็นวัสดุที่แข็งและลดแรงสั่นสะเทือนได้ดี จึงเป็นที่นิยมใช้

จากการศึกษาและวิเคราะห์เกมการแข่งขันในทุกระดับ เป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าลูกเสิร์ฟเป็นการตีลูกที่ทำให้ผู้เล่นได้เปรียบผู้เล่นฝ่ายตรงกันข้าม (Trabert, 1984; Williams, 2000) เพราะลูกที่เริ่มเล่นของการแข่งขันในแต่ละแต้ม ผู้เสิร์ฟสามารถที่จะควบคุมการเสิร์ฟ ไม่ว่าจะเป็ความเร็ว การหมุนของลูก และตำแหน่งที่ต้องการให้ลูกตกลงในคอร์ตบริเวณใด ภาสกร วัฒนธาดาและคณะ (2548) กล่าวถึง โดโนเกาและบอลเลนตินี (Donoghue, Ballantyne, 2004) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลขอความเร็วของการเสิร์ฟลูกเทนนิสประเภทชายเดี่ยวและหญิงเดี่ยวทั้ง 4 รายการ ได้แก่ ออสเตเรีย เลียโอเฟ่น เพรินซ์โอเฟ่น วิมเบิลดัน และยูเอสโอเฟ่น ในปี 2002 รวม 569 แม้ทการแข่งขัน พบว่าในประเภทชาย เมื่อผู้เสิร์ฟสามารถเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองลง ผู้เสิร์ฟลูกแรกจะมีโอกาสทำคะแนนเฉลี่ยสูงถึง 68-74 % ซึ่งมากกว่า ผู้เสิร์ฟลูกที่สองลง (56-58%) ส่วนในประเภทหญิงเช่นกัน เมื่อผู้เสิร์ฟสามารถเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองลง ผู้เสิร์ฟลูกแรกจะมีโอกาสทำคะแนนเฉลี่ยสูงถึง 60-66% มากกว่าผู้เสิร์ฟลูกที่สองลง (51-54%) จากข้อมูลวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นชัดเจนว่า ผู้เสิร์ฟจะเป็นฝ่ายที่ได้เปรียบในการแข่งขันในแต่ละแต้ม โดยเฉพาะในการเสิร์ฟลูกแรก ทั้งนี้ โชว์และคณะ (Chow et al, 2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองจากนักเทนนิสชาย 4 คน และหญิง 4 คน ในการแข่งขันเทนนิสประเภทเดี่ยวในกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า ปี ค.ศ. 1996 พบว่าการเสิร์ฟลูกแรกนั้นมีความเร็วของลูกเสิร์ฟมากกว่าการเสิร์ฟลูกที่สองถึง 24.1 % ทั้งในประเภทชายเดี่ยว (50.33 vs. 37.80 m.s<sup>-1</sup>, p<0.01) และในประเภทหญิงเดี่ยว (42.06 vs. 32.70 m.s<sup>-1</sup>, p<0.01)

โบรดีและครอสส์ (Brody, Cross, 2002) ได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกเทนนิส โดยใช้โมเดลเป็นครั้งแรก ในการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวด้วยกล้องที่สามารถบันทึกภาพได้ 100 ภาพต่อวินาที พบว่าลูกเสิร์ฟที่มีความเร็ว 45 m.s<sup>-1</sup> (162 km/hr หรือ 100 mile/hr) เกิดขึ้นจากไม้แร็กเกตกระทบลูกที่ตำแหน่งบนเอ็นที่มีความเร็ว 35 m.s<sup>-1</sup> (126 km/hr หรือ 79 mile/hr) มีสมการแรกได้แก่  $V = (1 + e_A) V_p$  โดย V คือ ความเร็วลูกเสิร์ฟเทนนิส V<sub>p</sub> คือ ความเร็วไม้แร็กเกตที่ตำแหน่งกระทบลูกเทนนิส และ e<sub>A</sub> คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความตึงเส้นเอ็นบนหน้าไม้และลูกเทนนิส (apparent coefficient of restitution) ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.29 (smash ratio: V / V<sub>p</sub> ratio = 1.2857) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ประมาณ 0.4 ที่กลางหน้าไม้แร็กเกต จากการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบหน้าไม้ที่แขวนในแนวตั้งและติดเครื่องมือวัดแรงสั่น เพื่อคำนวณหา

จุดที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (first sweet spot) คล้ายกับการวางไม้ในขณะที่รับลูกเทนนิสจากคู่ต่อสู้เพื่อตีโต้กลับ หรือการตีโฟร์แฮนด์การตีแบ็คแฮนด์ที่ความเร็วของไม้แรกเกิดอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสขณะกระทบไม้ไม่มีค่าสูง ทั้งนี้การเข้ากระทบจะแตกต่างกับการเสิร์ฟลูกของนักเทนนิสโดยสิ้นเชิง ที่ความเร็วลูกเสิร์ฟขณะกระทบนั้น เกิดจากไม้มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมาก เพื่อเข้าตีกระทบลูกเทนนิสที่เกือบจะหยุดนิ่ง นอกจากนี้ ซอพพิน (Choppin, 2008) ยังได้นำเสนอโมเดลรูปแบบการกระทบบนหน้าไม้ในการตีลูกโฟร์แฮนด์ (forehand shot) แบบ 3 มิติ โดยการยึดไม้แรกเกิดบริเวณหัวไม้ติดไว้กับที่ (freely suspending a racquet) และยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบเป็นการพัฒนาวิธีการทดสอบแบบใหม่ ซึ่งสามารถทำนายการเคลื่อนที่ของลูกเทนนิสหลังกระทบได้ดียิ่งขึ้น และในปัจจุบันสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (International Tennis Federation: ITF, 2009) ได้ใช้โมเดลนี้คำนวณหาความเร็วของลูกในการตีลูกโฟร์แฮนด์และแบ็คแฮนด์ เป็นต้น รวมถึงทำนายการเกิดการหมุน หรือการสปินของลูกเทนนิส (ball spin) ในขณะแข่งขันด้วย (Choppin, Goodwill, Haake, 2011)

จากการรายงานผลการแข่งขันกีฬาเทนนิสในระดับนานาชาติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ฮอว์ก-อาย (Cross, Pollard, 2009; ITF, 2009) พบว่า นักเทนนิสชายระดับแนวหน้าของโลก สามารถเสิร์ฟลูกเทนนิสให้มีความเร็วสูงสุด เกือบ 259 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (156 ไมล์ต่อชั่วโมง โดย Ivo Karlovic) และพบว่านักเทนนิสหญิงระดับแนวหน้าของโลก สามารถเสิร์ฟลูกเทนนิสให้มีความเร็วสูงสุดเกือบ 208 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (129 ไมล์ต่อชั่วโมง โดย Venus Williams) เช่นกัน ซึ่งจาก ค.ศ. 1870s ถึง 2007 พบว่าความเร็วของลูกเทนนิสในขณะที่เสิร์ฟ (serve speed) เพิ่มขึ้นถึง 17.5 % (Haake et al., 2007) ทั้งที่จุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิดต่างกันเพียง 20 มิลลิเมตร แต่ทำให้ลูกเทนนิสตกลงพื้นต่างกันถึง 1.45 เมตร อย่างไรก็ตามในการวิจัยเพื่อพิสูจน์ตำแหน่งจุดกระทบจากการเสิร์ฟลูกแรก (first serve) หรือลูกแฟลท (flat serve) ด้วยวิธีการเสิร์ฟลูกโดยตรงจากนักกีฬา หรือจากเครื่องทดสอบ (real strike) ในห้องปฏิบัติการ ปัจจุบันมีรายงานศึกษาวิจัยดังกล่าวน้อยมาก เพราะมีข้อจำกัดในการทดลองหลายประการ (Choppin, 2013) ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวนักกีฬาที่ไม่สามารถเสิร์ฟลูกให้ตรงตำแหน่งจุดกระทบที่ต้องการซ้ำๆ ได้ทุกครั้ง นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยที่สร้างแบบจำลองการเสิร์ฟลูก ด้วยการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบไม้แรกเกิด เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของโครงสร้างและความถี่จากแรงสั่นในไม้แรกเกิด (modal shape of racket frame) ในห้องปฏิบัติการ อาทิเช่นการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบหน้าไม้ ที่แขวนในแนวตั้งและติดเครื่องมือวัดแรงสั่น (Cross, 1998) เพื่อคำนวณหาจุดที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (first sweet spot: vibration node) ทั้งนี้มีความแตกต่างกับการเสิร์ฟลูกของนักกีฬาที่ไม่เทนนิส ที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมาก เพื่อเข้ากระทบลูกเทนนิสที่เกือบจะหยุดนิ่งในขณะที่เสิร์ฟจริง ทั้งนี้ตำแหน่งจุดกระทบที่ทำให้เกิดความเร็วลูกสูงสุด น่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเดิม โดยซอพพิน (Choppin,

2013) ได้รายงานว่าการเนื่องมาจากมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาช่วยด้วย อาทิเช่นความเร็วไม้แร็กเกตที่สูงมาก แรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น (moment of inertia) และแรงส่งที่เข้ากระทบกัน (momentum) เป็นต้น ประการสำคัญที่สุดคือ ยังไม่มีรายงานการศึกษาวินิจฉัยโมเดลทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกต ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกจากนักกีฬาเทนนิส ร่วมกับตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐานด้วยวิธีการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบ ซึ่งเป็นการศึกษาโมเดลที่ได้จากสถานะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) ถึงแม้ว่าจะควบคุมตัวแปรได้ค่อนข้างยากกว่า แต่ก็สามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์และอธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยตรง

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบเอ็นบนหน้าไม้เทนนิส ในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง และตำแหน่งจุดกระทบ รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างจุดกระทบ (smash ratio) และการแสดงออกของลูกเมื่อถูกกระทบ (ball behavior) จากการเสิร์ฟลูกแฟลท์ (flat serve) ด้วยเครื่องทดสอบ โดยการวิเคราะห์ภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ
2. เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยทำนาย (predictive impact model) ตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (max ball speed spot) ในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ ร่วมกับตัวแปรอิสระ (smash ratio) ที่ได้จากเครื่องทดสอบ

### คำถามของการวิจัย

1. ตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดอัตราเร่งและความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ของไม้แร็กเกต มีความแตกต่างกัน หรือไม่
2. โมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์จากนักกีฬานั้น ตำแหน่งจุดกระทบต่างๆ น่าจะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญเพิ่มอีกหนึ่งตัวแปรต่อโมเดล หรือไม่

### สมมุติฐานของการวิจัย

1. ตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดอัตราเร่งและความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในสามโครงสร้างไม้แร็กเกต น่าจะแตกต่างกันตามแต่ละรูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ของไม้แร็กเกต
2. การสร้างโมเดลทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์นั้น ตัวแปรค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ตำแหน่งจุดกระทบของลูกเทนนิส และรูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน น่าจะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อโมเดลสมการถดถอย

### ขอบเขตการวิจัย

1. การวิจัยครั้งนี้ ต้องการศึกษามอเดลแบบจำลองหาตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกพลีทจากการเสิร์ฟของนักกีฬาเยาวชนเทนนิสโดยใช้ตัวแปรอิสระบางส่วน จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบมาประกอบในโมเดลสมการถดถอย

2. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ นักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ จำนวน 6 คน และกำหนดอุปกรณ์ไม้เทนนิสชั้นนำจากต่างประเทศ 3 รูปแบบโครงสร้าง (วงรี สีเหลี่ยม และสามเหลี่ยม) ที่นักกีฬานิยมใช้จริง รวมถึงกำหนดลูกเทนนิส 1 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในรายการแข่งขันระดับนานาชาติ

3. การศึกษาครอบคลุมเฉพาะการเคลื่อนที่ของไม้แร็กเกตเข้ากระทบลูกเทนนิส เพื่อทำให้เกิดความเร็วสูงสุด (max ball speed spot) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างอัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิส หลังการเสิร์ฟด้วยเครื่องทดสอบจากไม้แร็กเกตในแต่ละผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้การศึกษามอเดลแบบจำลอง เพื่อหาตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกจากการเสิร์ฟของนักกีฬาเทนนิส และใช้ตัวแปรอิสระบางส่วนที่ได้มาตรฐาน (standardization data: smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบ แบบ 3 มิติ ในขั้นตอนแรกมาประกอบในโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบ เนื่องจากเป็นข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้จากการเสิร์ฟของนักกีฬาโดยตรง แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

*ขั้นตอนที่ 1* เพื่อศึกษาถึงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วของลูกเทนนิส จากการเสิร์ฟลูกพลีท ด้วยเครื่องทดสอบ โดยใช้ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศชนิดรวม 3 รูปแบบโครงสร้าง (วงรี สีเหลี่ยม และสามเหลี่ยม) อธิบายกลไกการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องขณะลูกเข้ากระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ณ จุดที่ทำให้เกิดความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด และเปรียบเทียบความแตกต่างความเร็วของลูกเทนนิสในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ และในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง

*ขั้นตอนที่ 2* เป็นการศึกษาโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุด ในการเสิร์ฟลูกพลีทจากนักเทนนิสเยาวชนทีมชาติ ร่วมกับตัวแปรอิสระบางส่วนจากเครื่องทดสอบ โดยการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยคือ นักเทนนิสเยาวชนทีมชาติชาย จำนวน 6 คน ที่ใช้ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศ 3 รูปแบบโครงสร้าง (จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 1)

#### 4. ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

##### 4.1) ตัวแปรต้น/อิสระ (Independent variables) คือ

- ความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบลูกเทนนิส (Pre-impact racket velocity)
- ความตึงของเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension)
- รูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ (Frame: สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงรี) ที่เกิดจาก ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความแข็งและตืดตัวของไม้แร็กเกต (Spring stiffness) และน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงไม้แร็กเกต (Swing weight of racket)
- ค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกต ( $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$  หรือ smash ratio) ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนหน้าไม้ (Impact position)

##### 4.2) ตัวแปรตาม (Dependent variables) คือ

- ความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกต (Post-impact ball velocity)

#### คำจำกัดความของการวิจัย

1. การเสิร์ฟฟลักแพล็ท (flat serve) หรือการเสิร์ฟฟลักแรก (first serve) หมายถึง การเสิร์ฟฟลักแบบพุ่งตรงและรุนแรง ทำให้ลูกเทนนิสที่ออกจากหน้าไม้มีอัตราเร่งและความเร็วสูงมาก ซึ่งเป็นการเสิร์ฟฟลักครั้งแรกในขณะที่แข่งขันกีฬาเทนนิส ตามกติกา ถ้าการเสิร์ฟฟลักแรกเสียไม่ลงคอร์ต ฝ่ายตรงกันข้ามในพื้นที่ที่กำหนด สามารถทำการเสิร์ฟฟลักที่สอง (second serve) ได้อีกหนึ่งครั้ง

2. อัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิส (acceleration and velocity of ball) ที่เกิดจากการเสิร์ฟฟลักด้วยเครื่องทดสอบ หมายถึง อัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการตีลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบลูกเทนนิสและไม้เทนนิสในห้องปฏิบัติการ

3. ตำแหน่งจุดกระทบที่ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือนของไม้แร็กเกต (sweet spot) หมายถึง จุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือนต่อถึงข้อมือ (Cross, 1998: Vibration node) ซึ่งจะทำให้ลูกเทนนิสเกิดความเร็วสูงสุด ในขณะที่ความเร็วไม้แร็กเกตต่ำ อย่างเช่นการออกแรงตีลูกโฟร์แฮนด์ (forehand shot) หรือในขณะที่วางไม้เพื่อรับลูกจากคู่ต่อสู้

4. ตำแหน่งจุดกระทบที่ทำให้ลูกมีความเร็วสูงสุด (maximum ball speed spot) หรือจุดพลังกระทบที่ทำให้ลูกเทนนิสมีความเร็วสูงสุด (power spot : Brody, 2002) หมายถึง จุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุด หรือพลังสูงสุดในขณะการเสิร์ฟฟลักแรก สามารถวัดค่าด้วยวิธีการเสิร์ฟฟลักโดยตรงจากเครื่องทดสอบ แล้ววิเคราะห์หาตำแหน่งจุดกระทบต่างๆ บนหน้าไม้แร็กเกต ซึ่งจะทราบตำแหน่งที่ชัดเจนแน่นอนที่ทำให้ลูกเกิดความเร็วสูงสุด แสดงถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะการใช้งานของแต่ละ ผลิตภัณฑ์รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต (วงรี สี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม)

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นนวัตกรรมเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกจากผลิตภัณฑ์ไม้เทนนิสในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง ทั้งนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตในกีฬาเทนนิสต่อไป

2. ทำให้ทราบถึงเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกระทบบนหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุด ในการเสิร์ฟลูกแรก (max ball speed spot) หรือพลังสูงสุด (power spot) เป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ เพื่อใช้ในการฝึกซ้อมและการแข่งขันกีฬาสำหรับนักกีฬา เพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก รวมถึงสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (International Tennis Federation: ITF) นำจะนำผลการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟแรกของนักกีฬาขณะแข่งขันได้แม่นยำยิ่งขึ้น

3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกผลิตภัณฑ์ไม้เทนนิส และความตึงเอ็นบนหน้าไม้ที่เหมาะสมในการเสิร์ฟของนักกีฬา ดังตัวอย่างในเว็บไซต์ ([www.tenniswarehouse](http://www.tenniswarehouse)) โดยจะทราบคุณลักษณะพิเศษเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไม้เทนนิสต่างๆ อาทิเช่น ไม้เทนนิส ชนิดเอ็นที่ใช้ สร้างความได้เปรียบทางการกีฬาอย่างถูกต้องตามกติกาและจริยธรรม รวมถึงชนิดกีฬาอื่น ๆ ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกันกับกีฬาเทนนิสได้



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วยุติสุดในการเสิร์ฟลูกพลัดจากนักกีฬาเยาวชนเทนนิสทีมชาติและเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ จึงได้รวบรวมเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้เป็นข้อมูลในการศึกษาค้นคว้าเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

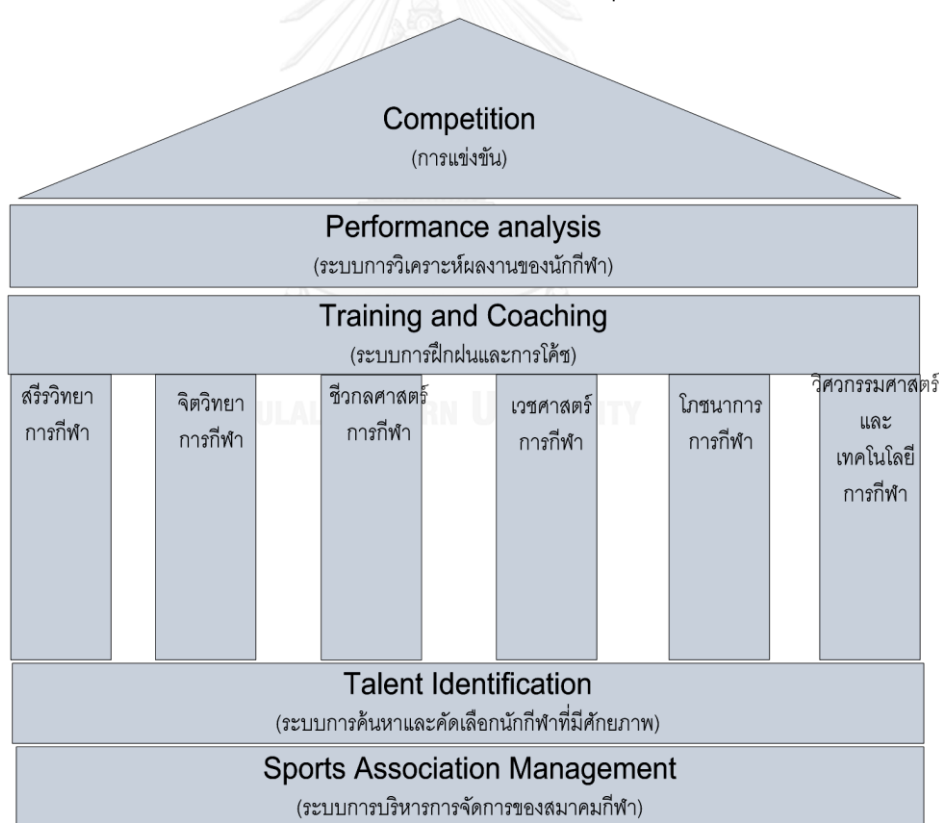
1. วิทยาศาสตร์การกีฬาสำหรับกีฬาเทนนิส
2. วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา  
(Sports Engineering and Technology)
3. องค์ประกอบที่สำคัญของนักเทนนิสชั้นยอด
4. ปัจจัยความสำเร็จในการเสิร์ฟลูกเทนนิสและโมเดล
5. โมเดลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้านวิศวกรรมศาสตร์การกีฬา  
(Model in Sports Engineering)
6. โมเดลที่นำมาใช้งานด้านเทคโนโลยีการกีฬาในกีฬาเทนนิส  
(Model in Sports Technology)

#### วิทยาศาสตร์การกีฬาสำหรับกีฬาเทนนิส

วิทยาศาสตร์การกีฬาได้เริ่มต้นการนำมาใช้อย่างจริงจังประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา เมื่อวารสารวิทยาศาสตร์การกีฬา (Journal of Sports Sciences) ได้ถือกำเนิดขึ้นเมื่อปี 1983 (Nevill et al., 2008) ในปัจจุบันถึงแม้วิทยาการจะก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก แต่ก็ยังมีช่องว่างระหว่างความเข้าใจของโค้ชและสมาคมกีฬาในการนำวิทยาศาสตร์การกีฬาเข้ามาประยุกต์ใช้ กับตัวนักวิทยาศาสตร์การกีฬาและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์การกีฬา (William & Reilly, 2000) ถึงแม้ว่าโค้ชจะเป็นผู้ได้รับผลประโยชน์โดยตรงจากการนำวิทยาศาสตร์การกีฬามาใช้ เพราะจุดประสงค์หลักของงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์การกีฬาคือการค้นหาพัฒนาทักษะของนักกีฬาใหม่ๆ เพื่อความสำเร็จในการแข่งขัน ในขณะที่เป้าหมายของโค้ชก็คือการนำเทคนิคใหม่ๆ มาสอนนักกีฬา เพื่อให้ให้นักกีฬาที่ตนเองฝึกสอนประสบความสำเร็จ ดังนั้นเราอาจจะมองได้ว่า นักวิจัยวิทยาศาสตร์การกีฬา คือ ผู้ส่งสาร และโค้ชคือ ผู้รับสาร หรือในกรณีที่โค้ชได้พัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ขึ้นมา นักวิทยาศาสตร์การกีฬาก็จะเป็นผู้ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของทักษะใหม่ๆ เหล่านี้ โดยทำการทดลอง หรือทดสอบนักกีฬาขึ้นมา (Goldsmith, 2000) ดังนั้นวิทยาศาสตร์การกีฬาไม่สามารถจะยืนอยู่ได้ด้วยตัวเอง ต้องอาศัยการสนับสนุนและความเข้าใจของภาคส่วนต่างๆ เข้ามาให้ความช่วยเหลือและความร่วมมือในการประยุกต์ใช้ความรู้แบบองค์รวม คือ “บ้านนักกีฬาเพื่อความเป็นเลิศ” จึงจะ

ทำให้การใช้วิทยาศาสตร์การกีฬาประสบความสำเร็จในการสร้างนักกีฬาช้างเผือกที่จะประสบความสำเร็จในการแข่งขันระดับนานาชาติได้จากแนวคิดบ้านนักกีฬาเพื่อความเป็นเลิศตั้งรูปด้านล่าง ฌอนมวงค์ ฌฤษณ์เพ็ชรและฌณะ (2552) ฌล่าวว่า เมื่อสมาคมกีฬามีการบริหารจัดการที่ดีและมีประสิทธิภาพแล้ว การค้นหาและการคัดเลือกนักกีฬาก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนา นักกีฬาไปสู่ความเป็นเลิศได้เร็วตามศักยภาพที่มีอยู่ (พรสวรรค์) โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การกีฬาทั้ง 7 สาขา มาช่วยในการคัดเลือก เปรียบเสมือนเป็นเสาหลักที่เชื่อมโยงระบบการคัดเลือก การฝึกซ้อม และการโค้ชที่ถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์การกีฬาของแต่ละชนิดกีฬา มีการวิเคราะห์ ทักษะหรือผลการแข่งขัน เพื่อให้ผู้ฝึกสอน ได้นำมาพัฒนาเป็นองค์ความรู้ในการฝึกฝนนักกีฬาต่อไป รวมทั้งมีการบริหารจัดการการแข่งขันอย่างต่อเนื่องทุกระดับจนถึงระดับนานาชาติและระดับโลก ซึ่ง องค์ความรู้ในด้านต่างๆ หลากหลายสาขาเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์การกีฬาสำหรับกีฬาเทนนิส (ศิลาชัย สุวรรณธาดา, 2552; Silvestre et al., 2006) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสาขาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่

### บ้านนักกีฬาเพื่อความเป็นเลิศ (House of Sport Excellence)



**รูปที่ 1** แสดงองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์การกีฬาทั้ง 7 สาขา ที่นำมาพัฒนาการฝึกซ้อมกีฬา เปรียบเสมือนเป็นเสาหลักที่เชื่อมโยงกับระบบต่างๆ จากบ้านนักกีฬาเพื่อความเป็นเลิศ (House of Sport Excellence)

## 1) สรีรวิทยาการกีฬา (Sports Physiology)

1.1) ความสามารถทางการเคลื่อนไหว (Motor Ability) โดยความสามารถทางการเคลื่อนไหวเป็นความสามารถทั่วไป ที่สำคัญในการแสดงทักษะของนักกีฬา ฟิล์สแมน (Flieshman, 1972) นักจิตวิทยาชาวอเมริกันได้จำแนกองค์ประกอบความสามารถทางการเคลื่อนไหวออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) ความสามารถทางการเคลื่อนไหวที่เกี่ยวกับสมรรถภาพทางกาย (Physical Fitness) และ 2) ความสามารถทางการเคลื่อนไหวที่เกี่ยวกับการรับรู้ (Perceptual Motor Ability) ความสามารถทางการเคลื่อนไหวที่สำคัญและจำเป็นในการเล่นกีฬาเทนนิสประกอบด้วย

### 1.1.1) องค์ประกอบที่เกี่ยวกับสมรรถภาพทางกาย

#### 1.1.1.1) สมรรถภาพการใช้ออกซิเจน (Aerobic Capacity)

หมายถึง ความสามารถในการทำงานของกล้ามเนื้อที่ใช้ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในการผลิตพลังงานในการเคลื่อนไหว โดยมีระบบหายใจและระบบไหลเวียนเลือด ทำหน้าที่นำออกซิเจนเข้าสู่ร่างกาย และไหลเวียนถ่ายเทให้กับกล้ามเนื้อ การออกกำลังกายแบบนี้ช่วยในการพัฒนาระบบหายใจและระบบไหลเวียนเลือดให้มีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันยังเพิ่มความสามารถในการใช้ออกซิเจนของกล้ามเนื้อให้ดีขึ้นด้วย กีฬาเทนนิสเป็นกีฬาที่ต้องใช้เวลาแข่งขันที่ยาวนานและต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นต้องฝึกสมรรถภาพการใช้ออกซิเจนให้อยู่ในระดับสูง เพื่อทำให้นักกีฬามีความอดทน เหนื่อยช้าและหายเหนื่อยเร็ว

#### 1.1.1.2) สมรรถภาพการไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Capacity)

หมายถึง ความสามารถที่กล้ามเนื้อสะสมพลังงานในการเคลื่อนไหว และสามารถนำออกมาใช้ได้เมื่อต้องการ การฝึกแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ ช่วยทำให้ร่างกายทนต่อสภาวะการเกิดกรดแลคติก ซึ่งนับว่ามีความสำคัญต่อกีฬาเทนนิสเป็นอย่างยิ่ง และเป็นระบบพลังงานหลักที่ใช้ในกีฬาเทนนิส

1.1.1.3) ความแข็งแรง (Strength) หมายถึง ความสามารถในการใช้แรงได้สูงสุดของกล้ามเนื้อ นักกีฬาเทนนิสที่ประสบความสำเร็จในการแข่งขันต้องมีกล้ามเนื้อที่แข็งแรง เพราะนักกีฬาต้องแสดงทักษะ การวิ่ง การตีลูกซำๆ ตลอดการแข่งขัน ต้องควบคุมกล้ามเนื้อให้หดตัวอย่างพอเหมาะพอดี เพื่อแสดงทักษะการเคลื่อนไหวให้บรรลุเป้าหมาย

1.1.1.4) ความเร็ว (Speed) หมายถึง ความสามารถในการเคลื่อนไหวหรือเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาน้อยที่สุด ความสามารถในการเคลื่อนไหวได้อย่างเร็ว ทั้งทางด้านหน้า ด้านข้าง และด้านหลัง เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะช่วยให้นักกีฬาเทนนิสประสบความสำเร็จในการแข่งขัน

1.1.1.5) พลัง (Power) หมายถึง ความสามารถที่ใช้แรงสูงสุดของกล้ามเนื้อภายในเวลาสั้นที่สุด พลังนี้เป็นองค์ประกอบการเคลื่อนไหวที่สำคัญในการเริ่มออกตัวไป

ทางซ้าย ทางขวา ข้างหน้าและข้างหลัง เพื่อตีลูกเทนนิส รวมทั้งการกระโดดขึ้น เพื่อการตบลูกเหนือศีรษะในขณะแข่งขัน

1.1.1.6) ความคล่องแคล่วว่องไว (Agility) หมายถึง ความสามารถในการปรับเปลี่ยนจังหวะและทิศทางในการเคลื่อนไหวได้โดยง่าย ด้วยความเร็วและมีประสิทธิภาพ รวมทั้งความสามารถทางกายที่ต้องอาศัยความกระฉับกระเฉง ความเร็ว ความอ่อนตัว กำลัง การทรงตัวและความสัมพันธ์ในการเคลื่อนไหวตามทักษะกีฬาเทนนิส

1.1.1.7) ความอ่อนตัว (Flexibility) หมายถึง ความสามารถในการทำงานของข้อต่อทุกอิริยาบถ ด้วยระยะทางหรือมุมการเคลื่อนไหวที่มากกว่าปกติ มุมการเคลื่อนไหวของข้อต่อแต่ละส่วนของร่างกายขึ้นอยู่กับ เอ็น ฟังผืด เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และกล้ามเนื้อที่ยึดเกาะอยู่โดยรอบข้อต่อนั้น

#### 1.1.2) องค์ประกอบที่เกี่ยวกับการรับรู้

1.1.2.1) ความสัมพันธ์ของประสาท-กล้ามเนื้อ (Neuro-muscular Coordination) หมายถึงความสามารถในการปฏิบัติการเคลื่อนไหวที่ใช้ร่างกายหลายส่วนประกอบกัน เพื่อให้บังเกิดผลหรือทักษะตามต้องการด้วยจังหวะการเคลื่อนไหวที่เป็นไปตามลำดับขั้นของทักษะและในแต่ละส่วนของร่างกายอย่างสัมพันธ์กัน ทำให้การแสดงทักษะนั้นเป็นไปอย่างง่าย รวดเร็ว สวยงาม และมีประสิทธิภาพ

1.1.2.2) เวลาปฏิกิริยา (Reaction time) หมายถึง ช่วงเวลาที่ร่างกายถูกกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอก จนถึงเวลาที่ร่างกายเริ่มตอบสนองต่อสิ่งเร้า นั้น ในขณะที่เล่นเทนนิส นักกีฬาเห็นคู่ต่อสู้เสิร์ฟลูกมาทางโพร์แฮนด์ แล้วนักกีฬาเริ่มตอบสนองการเคลื่อนที่และเหวี่ยงไม้ เพื่อที่รับลูกเสิร์ฟนั้น เวลาปฏิกิริยาจึงหมายถึง ช่วงเวลาที่นักเทนนิสเห็นคู่ต่อสู้เสิร์ฟ แล้วตนเองเริ่มเคลื่อนไหว ถ้านักกีฬามีเวลาปฏิกิริยาเร็ว จะเริ่มเคลื่อนไหวตอบสนองคู่ต่อสู้ได้เร็วด้วย

1.1.2.3) การทรงตัว (Balance) หมายถึง การที่ประสาทการรับรู้ความรู้สึกของร่างกายโดยเฉพาะที่อยู่ในกล้ามเนื้อ ข้อต่อ และประสาทควบคุมการทรงตัวภายในหูและประสาทตา เพื่อรักษาความสมดุลของร่างกายให้อยู่ในท่าต่าง ๆ ทั้งในขณะที่อยู่กับที่และในระหว่างการเคลื่อนที่ทำงานประสานสัมพันธ์กัน เช่น การทรงตัวที่ดีในการวิ่งตีลูกเทนนิส

1.2) การฝึกความเร็วทางตรง (Linear Speed Drill) การฝึกความเร็วทางตรงหรือเส้นตรงนี้ เป็นการรวมการวิ่งไปข้างหน้าและการวิ่งถอยหลังเข้าด้วยกัน โดยใช้ช่วงระยะการฝึก 3-6 เมตร หรืออาจจะเริ่มจากเส้นเสิร์ฟ เมื่อนักกีฬามีความสามารถดีขึ้น ให้ปรับความหนักหรือระยะทางในการเคลื่อนไหวเพิ่มขึ้นเป็น 8-10 เมตร หรือเริ่มวิ่งจากเส้นหลังของสนามเทนนิส (baseline) ไปยังตาข่ายและวิ่งถอยหลังกลับ ซึ่งการฝึกสามารถประยุกต์ได้หลายรูปแบบ โดยอาจจะ

โยนลูกบอลให้นักกีฬาวิ่งไปเก็บที่เส้นเสิร์ฟ แล้ววิ่งถอยหลังกลับมาที่เส้นหลัง หรือวิ่งไปเก็บลูกบอลที่เส้นข้างของแดนเสิร์ฟ แล้ววิ่งกลับมาที่ตรงกลางเส้นหลัง เป็นต้น

1.3) การฝึกความเร็วทางด้านข้าง (Lateral Speed Drill) การฝึกก้าวเท้าทางข้าง สามารถปฏิบัติได้โดยใช้แร็กเกต หรือไม่ใช้แร็กเกตร่วมในการฝึกก็ได้ โดยให้นักกีฬายืนที่กึ่งกลางเส้นหลัง (baseline) จากนั้นเริ่มก้าวเท้าขวาออกทางด้านข้าง เคลื่อนที่ไปด้านขวาของสนาม เมื่อถึงเส้นข้างด้านขวาของสนามประเภทเดียว ให้นักกีฬาเคลื่อนตัวไปสู่ด้านข้างทางด้านซ้ายแล้วเคลื่อนที่กลับมาที่กึ่งกลางของเส้นหลัง สิ่งที่สำคัญผู้ฝึกสอนกีฬาต้องเน้น หรือย้ำให้นักกีฬาปฏิบัติ การเคลื่อนไหวที่ถูกต้องและเร็วที่สุด ที่จะสามารถทำได้ นอกจากนี้การฝึกในลักษณะเดียวกันสามารถเพิ่มความหนักด้วยสายยางผูกมัดที่ข้อเท้าทั้งสองข้าง เพื่อเพิ่มความต้านทานให้กล้ามเนื้อสะโพกและขา มีความแข็งแรงและความเร็วเพิ่มมากขึ้น

1.4) การฝึกเกิน (Overtraining) การฝึกเกิน คือ สภาวะทางอารมณ์พฤติกรรม และร่างกายที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาณหรือความหนักของการออกกำลังกายของนักกีฬาเกินกว่าสมรรถภาพในการฟื้นตัวของนักกีฬา การฝึกเกินจะก่อให้เกิดพัฒนาการอารมณ์ทางลบ เช่น ความโกรธ ความกลัว ความวิตกกังวล และอื่น ๆ สูงขึ้น รวมทั้งการแสดงความสามารถลดลงในด้านความแข็งแรง สมรรถภาพการใช้ออกซิเจน และอื่น ๆ สาเหตุของการฝึกเกินอาจเนื่องมาจาก (1) นักกีฬามีความเครียดและความกดดันมากเกินไป (2) มีการฝึกซ้อมทางกายและจิตมากเกินไป (3) รู้สึกเหนื่อยทางร่างกายและปวดเมื่อยทั่วไป (4) เกิดความเบื่อหน่ายจากการกระทำที่ซ้ำซากมากเกินไป (5) การพักผ่อนและหลับนอนไม่เพียงพอ

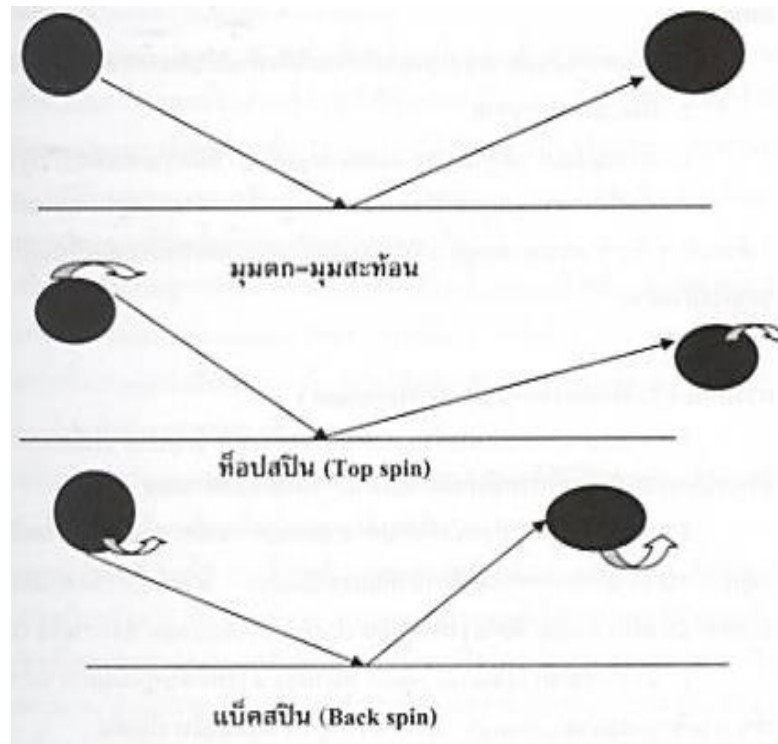
## 2) ชีวกลศาสตร์การกีฬา (Sports Biomechanics)

2.1) การหมุน (Spin) ของลูกเทนนิส การหมุนของลูกเทนนิสเป็นไปได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงและมุมที่กระทำต่อลูก เช่น หมุนตามนาฬิกา หมุนทวนเข็มนาฬิกา หมุนเข้าด้านใน และหมุนออกด้านนอก

2.1.1) การหมุนท้อปสปิน (Topspin) เป็นการหมุนของลูกในลักษณะของการกระทบด้านหลังขึ้นข้างบนของลูก ลูกจะหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (จากรูป) เมื่อตกลงสู่พื้น ลูกจะกระดอนขึ้นสู่พื้นเป็นมุมที่น้อยกว่าลักษณะมุมปกติ แต่มีความแรงและเร็ว ใช้ในกรณีที่ต้องการตีท้ายคอร์ต เพื่อให้ลูกพุ่งไปข้างหน้าได้เร็วและแรง เป็นลูกที่รับยาก เนื่องจากลูกตกช้า แต่กระดอนขึ้นด้วยความเร็ว การรับลูกนี้จะต้องเข้ารับลูกให้เร็ว ข้อเสียคือ ถ้าตีไม่ถึงท้ายคอร์ต คนรับจะตีลูกกลับได้ง่าย

2.1.2) การหมุนแบ็คสปิน (Backspin) เป็นการหมุนของลูกในลักษณะของการกระทบด้านหลังลงไปได้ลูก ลูกจะหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา หรือตกถึงพื้นลูกจะ

กระดิ่งขึ้น โดยมีแนวโน้มไปข้างหน้าเล็กน้อยแต่ช้า ใช้การเล่นลูกนี้เมื่อต้องการหยอดที่หน้าตาข่ายหรือลูกลอยไปท้ายคอร์ต



รูปที่ 2 แสดงลักษณะการตกกระทบของลูกเทนนิสถึงพื้นและการกระดิ่งขึ้น

2.2) วิธีสร้างความเร็วในการตีโฟร์แฮนด์และแบ็คแฮนด์ การใช้ไม้แร็กเกตที่มีกรอบหนาและแข็งจะดีกว่ากรอบที่มีความยืดหยุ่น เนื่องจากพลังงานจากลูกที่มากกระทบหน้า จะถูกเก็บไว้ในกรอบได้น้อยกว่ากรอบที่มีความยืดหยุ่น ทำให้ลูกมีพลังจลน์สูง กระดอนกลับไปได้แรงกรอบไม้หรือหน้าไม้ที่ใหญ่กว่า จะช่วยให้เกิดความมั่นคง โดยไม้ไม่บิด ในกรณีที่ลูกไม่กระทบจุดศูนย์กลาง



รูปที่ 3 แสดงวิธีสร้างความเร็วในการตีโฟร์แฮนด์และแบ็คแฮนด์

2.3) การบิดของหน้าไม้ การจับไม้มีข้อถกเถียงกันอย่างมาก โดยบางคนกล่าวว่า การจับไม้ให้แน่นจะทำให้ตัวไม้มีน้ำหนัก ทำให้ช่วยเพิ่มพลังในการตี แต่ปัจจุบันพบว่า การจับไม้หลวมเล็กน้อย โดยให้ไม้มีโอกาสได้บิดหมุนบ้าง จะช่วยในการควบคุมการตี โดยเฉพาะลูกที่ขณะกระทบหลังเส้นทางการเดินทางของแรงไม่ผ่านจุดศูนย์กลางของไม้

## วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา (Sports Engineering and Technology)

เป็นสาขาที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัย โดยสามารถจำแนกรายละเอียดได้ดังนี้

1) รูปแบบโครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์ ศิลปชัย สุวรรณธาดา (2552) กล่าวว่า จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีของอุปกรณ์ไม้แร็กเกตเทนนิสเป็นอย่างมาก นับตั้งแต่หน้าหนักจนถึงรูปร่างของไม้แร็กเกต เพื่อความเหมาะสมของนักกีฬาเทนนิสทั้งนี้ขนาดของไม้แร็กเกตในปี 1976 นั้น เฮวาร์ดเฮตต์ได้เริ่มต้นพัฒนาหน้าไม้แร็กเกตให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ช่วยให้เทนนิสทั่วไปเล่นเทนนิสได้ง่ายและสนุกสนานมากขึ้น เนื่องจากหน้าไม้มีจุดกระทบลูก (sweet spot) มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดหน้าไม้แร็กเกตในปัจจุบันแบ่งเป็น หน้าไม้ขนาด Mid มีพื้นที่ 93 ตารางนิ้วและน้อยกว่า, หน้าไม้ขนาด Mid-plus มีพื้นที่ 94-105 ตารางนิ้ว, หน้าไม้ขนาด Oversized มีพื้นที่ 106-122 ตารางนิ้วและ หน้าไม้ขนาด Super-oversized มีพื้นที่ 122 ตารางนิ้ว และมากกว่า นอกเหนือจากขนาดของหน้าไม้แล้ว จุดสมดุลและขนาดของกริฟก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย จุดสมดุลของไม้เปลี่ยนแปลงตามความพึงพอใจของเทนนิส ขึ้นอยู่กับสไตล์การเล่น มีการเลือกระหว่างไม้หัวหนักและไม้หัวเบา รวมถึงจุดสมดุลของหน้าหนักไม้ (balance) คือระยะห่างจากจุดสมดุลของมวลไม้แร็กเกตรวม (racket mass) ถ้าเลือกไม้หัวหนักช่วยเพิ่มพลังในการเสิร์ฟและการตีลูกกระดอน ส่วนไม้หัวเบาช่วยในการควบคุมการตี ขนาดของกริฟก็มีผลต่อการเล่นเช่นเดียวกัน ซึ่งอยู่กับความเฉพาะของนักเทนนิสแต่ละคน

2) วัสดุและน้ำหนัก (Racket materials) แร็กเกตในสมัยแรกทำด้วยไม้ ซึ่งเกิดปัญหาความไม่แน่นอน เช่น ไม้ต่างชนิดกันจะทำให้เกิดความรู้สึกแตกต่างกันในการตีลูก ต่อมาบริษัทผลิตไม้แร็กเกตได้ทดลองนำเอาวัสดุโลหะมาใช้ เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม ไททานเนียม ต่อมาหลายบริษัทได้ทดลองใช้วัสดุโบรอน เซรามิกกราไฟท์ และวัสดุผสม วัสดุแต่ละอย่างมีคุณสมบัติเฉพาะตัว แต่เซรามิก และกราไฟท์ ได้รับเลือกเป็นวัสดุที่แข็ง มีน้ำหนักเบา และลดแรงสั่นสะเทือนได้ดีตั้งนั้นทั้งรูปแบบโครงสร้างและวัสดุของไม้เทนนิสแต่ละผลิตภัณฑ์จะมีผลต่อการออกแรงตีลูกของนักเทนนิส ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น (the moment of inertia) จากรูปแบบโครงสร้างและวัสดุของไม้เทนนิส ขณะการออกแรงตีว่ามีค่าเพิ่มขึ้นมากเท่าไร รูปแบบโครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์ของไม้แร็กเกตแต่ละยี่ห้อที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่ม ได้แก่ รูปร่างวงรี อาทิเช่น ไม้แร็กเกตยี่ห้อ Dunlop, รูปร่างสี่เหลี่ยม เช่น ไม้แร็กเกตยี่ห้อ Yonex และรูปร่างสามเหลี่ยมหัวกลับเช่นไม้

แร็กเกตยี่ห้อ Prince ดังนั้นนักกีฬาต้องออกแรงเพื่อที่จะเอาชนะแรงเฉื่อยนี้ ซึ่งค่าแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นก็คือ น้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงไม้แร็กเกต โดยกำหนดจุดหมุนในการเหวี่ยงอยู่ที่ตรงกลางของกริฟที่มือจับ (swing weight of racket) ซึ่งจะส่งผลต่อจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้และตำแหน่งจุดกระทบด้วย ที่ทำให้ลูกเทนนิสเกิดความเร็วน้อยเพียงใด ทั้งนี้ ค่าน้ำหนักการกระจายแรงเหวี่ยงไม้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบโครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์ของไม้เทนนิสแต่ละยี่ห้อ และค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงไม้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตนั้นมีน้ำหนักที่ปลายหัวไม้มากขึ้น หรือมีการเพิ่มน้ำหนักที่ปลายหัวไม้แร็กเกต (BrodyH, Cross R, Lindsey C, 2006)

#### รูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของหน้าไม้แร็กเกตแต่ละยี่ห้อ หรือผลิตภัณฑ์มีรูปร่างแตกต่างกัน

**3) ความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต (Stiffness of racket)** นอกจากขนาดโครงสร้างหน้าไม้และวัสดุของไม้เทนนิสแต่ละผลิตภัณฑ์แล้ว ประสิทธิภาพรวมของไม้แร็กเกตยังสามารถแสดงได้จากความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต ที่จะมีผลต่อความเร็วของลูกเทนนิสด้วย ซึ่งในขณะที่เฟรแฮนด์ที่ใช้ความเร็วไม้แร็กเกตต่ำ หรือขณะวางไม้เพื่อรับลูก และการยึดไม้อยู่กับที่เพื่อทดสอบอุปกรณ์ ถ้าค่าความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกตมาก จะทำให้ลูกเทนนิสขณะที่กระทบมีการสูญเสียพลังงานให้กับไม้ น้อย ส่งผลทำให้ลูกเทนนิสหลังการกระทบมีความเร็วกว่า (Allen, Haake, Goodwill, 2011) รวมถึงในขณะที่เสิร์ฟลูกแรกหรือการวอลเลย์ตบลูก ซึ่งความเร็วของไม้แร็กเกตเพิ่มขึ้นสูงมาก ทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสหลังจากกระทบยังมีค่ามากขึ้นอีก ดังนั้นไม้แร็กเกตที่มีค่าความแข็งแรงแรงที่สูง จะมีประสิทธิภาพในการส่งลูกเทนนิส หรือลูกเทนนิสตั้งดีกว่า ซึ่งเหมาะกับนักกีฬาที่มีความแข็งแรงแรงกล้ามเนื้อดี สามารถควบคุมและออกแรงเสิร์ฟได้มาก ทำให้ลูกที่เสิร์ฟมีความเร็วสูงและรุนแรง (Haake et al., 2007; Mitchell et al., 2000; Hatze, 1994)

**4) เส้นเอ็น (String)** เริ่มแรกเส้นเอ็นทำมาจากลำไส้ของวัว ซึ่งปัจจุบันเรียกว่า เอ็นธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติดีมาก แต่ราคาแพง เทคโนโลยีได้มีการพัฒนามากขึ้น โรงงานหลายแห่งได้พยายามเลียนแบบคุณสมบัติของเอ็นธรรมชาติด้วยการใช้เอ็นสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบให้



เอ็นมีการหมุนมากขึ้น พลังมากขึ้น และทนทานมากขึ้น ทั้งนี้ในขณะที่เสิร์ฟลูกแรก หรือการวอลเลย์ตบลูก ซึ่งความเร็วของไม้แร็กเกตเพิ่มขึ้นสูงมาก ๆ ถ้ามีการขึ้นความตึงของเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (string tension) มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและหย่อนลงเล็กน้อย หรือมีค่าน้อยกว่า ช่วยทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสเพิ่มขึ้น เนื่องจากในขณะที่เสิร์ฟลูกแรก ลูกเทนนิสที่เข้ากระทบเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต ค่าความตึงของเอ็นที่หย่อนลงเล็กน้อย ทำให้สามารถสะสมพลังงานไว้ได้ดีและส่งแรงสปริงตัวกลับได้ดีกว่า จึงส่งผลทำให้ลูกเทนนิสหลังการกระทบมีความเร็วเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน (Bower R, Cross R, 2005) ซึ่งส่งผลในทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต

**5) ลูกเทนนิส (Tennis Ball)** ลูกเทนนิสในตอนแรกๆ ทำด้วยเศษผ้าที่มัดเข้าด้วยกันอย่างแน่น สุดท้ายได้ใช้เศษผ้าม้วนเป็นแกนแล้วคลุมด้วยผ้าชนิดดีหรือเย็บเป็นตะเข้รอบๆ ในปี 1972 ลูกเทนนิสได้ผลิตด้วยสั๊กพลาสติกเหลือง และใช้มาจนถึงทุกวันนี้

**6) คุณสมบัติของคอร์ตเทนนิส (Tennis Court)** นักเทนนิสระดับนานาชาติทุกคนรู้ว่า พื้นผิวของสนามแต่ละชนิด มีผลต่อความเร็วของลูกเทนนิสและลีลา (style) การเล่นของนักกีฬา แต่ที่สำคัญที่สุด นักเทนนิสควรทราบถึงผลทางสรีรวิทยาที่เกิดขึ้นกับนักกีฬาในการเล่นบนคอร์ตที่มีพื้นผิวแตกต่างกันคุณสมบัติของคอร์ตดิน (clay court) นั้นนักวิทยาศาสตร์การกีฬาชาวแคนาดา (Murias, 2007) ได้พยายามที่จะศึกษาถึงผลทางสรีรวิทยาดังกล่าวกับนักกีฬาเทนนิสระดับชาติจำนวน 4 คน โดยกำหนดให้มีการแข่งขันบน คอร์ตดินและคอร์ตแข็ง และใช้เวลามากกว่า 1,290 นาทีในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการประเมินการใช้ออกซิเจน อัตราการเต้นของหัวใจ และความเข้มข้นของกรดแลคติกในเลือด นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ เวลา ระยะทาง เวลาการเล่น เวลาพัก และอัตราส่วนการออกกำลังกายและการพักผลการวิเคราะห์ พบว่า เวลาเล่นโดยเฉลี่ยระหว่างการแข่งขันบนคอร์ตดินใช้เวลามากกว่าบนคอร์ตแข็ง เวลาพักของการเล่นบนคอร์ตดินและคอร์ตแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อัตราส่วนระหว่างการออกกำลังกายและการพักบนคอร์ตแข็งต่ำกว่าบนคอร์ตดินและระยะทางที่วิ่งบนคอร์ต หมายถึง อัตราการเต้นของหัวใจและกรดแลคติกในเลือดที่เกิดจากการเล่นบนคอร์ตดินมีปริมาณสูงกว่าการเล่นบนคอร์ตแข็ง ดังนั้น ถ้ามีการแข่งขันบนคอร์ตดิน นักกีฬาต้องปรับโปรแกรมการสร้างสรรค์สมรรถภาพทางกายให้เหมาะสมกับความต้องการของการเล่นดังกล่าว

**7) เทคโนโลยีในการถ่ายทอดการแข่งขัน (Sports Media Technology)** ระบบคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีที่ใช้ในการประมวลผลการแข่งขันเทนนิสระดับนานาชาติ อาทิเช่น รายการแข่งขัน ATP และ WTA จะมีการรายงานผล โดยระบบคอมพิวเตอร์แบบฮอว์ก-อาย (Hawk-eye) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ตัวระบบประกอบด้วยกล้องถ่ายภาพโทรทัศน์ความเร็วสูง จำนวน 5-6 ตัวที่ควบคุมพื้นที่คอร์ต เทนนิส ทำหน้าที่จับความเคลื่อนไหวของทั้งผู้เล่นและลูกเทนนิส ข้อมูลดังกล่าวจะถูกป้อนเข้าสู่คอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์เพื่อการประมวลผลที่มีทั้งขีดความสามารถในการคำนวณ และมีความเร็วในการประมวลผล จนสามารถพล็อตออกมาเป็นภาพจำลอง 3 มิติ ของการเคลื่อนไหวของลูกจาก

เริ่มต้นกระทบหน้าไม้ไปจนถึงจุดตก และการกระดอนของลูกได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้จะแสดงจุดกระทบ ลูกเทนนิสได้อย่างแม่นยำทำให้การตัดสินใจของกรรมการมีประสิทธิภาพแล้ว รวมทั้งการเคลื่อนไหวของ นักกีฬา เช่น นักกีฬาอาจสงสัยว่าลูกที่ตนเองรับเพื่อเล่นต่อไปนั้น ความจริงแล้วจะเป็นลูกออกนอกคอร์ต หรืออยู่ในคอร์ตฮอว์ก-อายนี้ก็จะให้ข้อมูลได้ ดังนั้นฮอว์ก-อายจึงให้ข้อมูลทั้ง Feedback และ Feed forward ได้ด้วยฮอว์ก-อายยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การเล่น ซึ่งสามารถที่จะทำนาย เส้นทางของลูกบอลในอนาคตได้อีกด้วย

### องค์ประกอบที่สำคัญของนักเทนนิสชั้นยอด

ศิลปชัย สุวรรณธาดา (2552) ได้ศึกษาปัจจัยความสำเร็จของชนิดกีฬาที่เป็นความหวัง ของประเทศไทยในกีฬาเทนนิส จากผู้ทรงคุณวุฒิในสถาบันอุดมศึกษา การกีฬาแห่งประเทศไทย และ ลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทยฯ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการหาค่าเฉลี่ยของความ สอดคล้องและระดับความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ พบว่าปัจจัยความสำเร็จของนักกีฬาที่เป็น ความหวังของประเทศไทยซึ่งประกอบด้วย 6 ระบบ ดังนี้

1. ระบบการบริหารจัดการของสมาคมกีฬา ได้แก่ มีการจัดทำนโยบายและโครงการ ต่างๆอย่างต่อเนื่อง, มีบทบาทสำคัญในสหพันธ์กีฬานานาชาติ, มีโครงสร้างการบริหารงานที่ดี และมีประสิทธิภาพ และมีการจัดการแข่งขันกีฬาระดับนานาชาติ

2. ระบบการค้นหาและคัดเลือกนักกีฬาที่มีความสามารถพิเศษ ได้แก่ การประเมิน สมรรถภาพทางจิต: ความเข้มแข็งทางจิตและแรงจูงใจใฝ่สัมฤทธิ์, การประเมินสมรรถภาพทางกาย: ความแข็งแรงพลัง ความอดทน และความสัมพันธ์ของประสาท-กล้ามเนื้อ และมีการคัดเลือกโดยการ ประเมินทางสถิติ การฝึกซ้อมและการแข่งขัน

3. ระบบวิทยาศาสตร์การกีฬา ได้แก่ *สรีรวิทยาการกีฬา*: ความคล่องแคล่วว่องไว ความสัมพันธ์ของประสาท-กล้ามเนื้อ ส่วนสูง น้ำหนักและสัดส่วนของร่างกาย และสมรรถภาพการใช้ ออกซิเจน, *จิตวิทยาการกีฬา*: สมาธิ การตั้งเป้าหมาย แรงจูงใจใฝ่สัมฤทธิ์ และการจัดการกับความเครียดและความวิตกกังวล, *ชีวกลศาสตร์การกีฬา*: มีการวิเคราะห์ทักษะการเคลื่อนไหว มีการใช้ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทันสมัย และมีการบันทึกสถิติและข้อมูลทางชีวกลศาสตร์, *เวชศาสตร์การ กีฬา*: การอบอุ่นร่างกายและการผ่อนคลายกล้ามเนื้อและมีการป้องกันความเสี่ยงต่ออันตรายในการ ฝึกซ้อมและแข่งขัน, *โภชนาการกีฬา*: มีการให้ความรู้เรื่องโภชนาการแก่นักกีฬาและมีการสำรวจการ ใช้พลังงานของนักกีฬา และ *วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา*: การใช้อุปกรณ์ที่ทันสมัยเพื่อ ประสิทธิภาพในการฝึกซ้อม/มีอุปกรณ์เสริมสร้างสมรรถภาพทางกาย

4. ระบบการฝึกซ้อมและการโค้ช ได้แก่ มีการเสริมสร้างสมรรถภาพทางกาย และ เสริมสร้างสมรรถภาพทางจิต

5. ระบบการวิเคราะห์ผลงานของนักกีฬา ได้แก่ มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้นักกีฬาสามารถวิเคราะห์ผลงานของตนเอง

6. ระบบการแข่งขัน ได้แก่ มีการศึกษาข้อมูลของคู่ต่อสู้ และมีการวิเคราะห์เกมการแข่งขันทั้งของฝ่ายตนเองและคู่ต่อสู้

ส่วนในการจัดอันดับความสำคัญของ *ปัจจัยความสำเร็จของกีฬาเทนนิส* พบว่า อันดับ 1 ระบบการค้นหาและคัดเลือกนักกีฬาที่มีความสามารถพิเศษ อันดับ 2 ระบบการบริหารจัดการสมาคมกีฬา ฯ และอันดับ 3 ระบบวิทยาศาสตร์การกีฬา ทั้งนี้การจัดอันดับความสำคัญของ *ระบบวิทยาศาสตร์การกีฬา* พบว่า อันดับ 1 สรีรวิทยาการกีฬา อันดับ 2 จิตวิทยาการกีฬา และอันดับ 3 ชีวกลศาสตร์การกีฬา ในการจัดอันดับความสำคัญของ *สมรรถภาพทางกายและสมรรถภาพทางจิต* โดยสมรรถภาพทางกาย พบว่า อันดับ 1 ความสัมพันธ์ของสายตา-มือและเท้า อันดับ 2 คือ พลังของกล้ามเนื้อ และอันดับ 3 คือ ความเร็ว ส่วนสมรรถภาพทางจิต พบว่า อันดับ 1 ความเชื่อมั่นในตัวเอง อันดับ 2 สมาธิ และอันดับ 3 ความสามารถในการวิเคราะห์

MacCurdy (2006) กล่าวว่า จากการศึกษาค้นคว้าและวิจัยองค์ประกอบหลักของนักกีฬาเทนนิสชั้นเยี่ยมนั้น องค์ประกอบหลักของตัวบ่งชี้ในการเป็นนักกีฬาเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษ แบ่งออกเป็น 6 ประเภท ดังนี้

1. องค์ประกอบด้านสรีรวิทยา (Physiological Factors) การทดสอบทางสรีรวิทยาสามารถใช้การวัดส่วนสูง น้ำหนัก ความกว้าง ชนิดของร่างกาย และการวัดขนาดและสัดส่วนของร่างกายวิธีอื่น ๆ ถึงแม้ว่าตลอดระยะเวลา 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา นักกีฬาเทนนิสระดับโลกจะมีรูปร่างที่สูง แต่ก็ยังมีข้อยกเว้นซึ่งถือเป็นข้อเตือนใจที่ดีก่อนที่จะตัดสินใจว่า นักกีฬาเทนนิสคนใดจะไม่มีรูปร่างที่ใหญ่เกินไปในการที่จะเล่นเทนนิส

2. องค์ประกอบด้านร่างกาย (Physical Factors) โดยผู้เล่นที่มีข้อได้เปรียบทางร่างกายจะมีโอกาสที่ดีกว่าในการที่จะถูกเลือก ในช่วงอายุระหว่าง 10-12 ปี และต่ำกว่า องค์ประกอบด้านประสบการณ์การเล่น ทักษะด้านเทคนิคการเล่น และการเจริญเติบโตทางชีววิทยา คือ ส่วนสำคัญที่มีผลต่อผลการเล่น เมื่อผู้เล่นมีอายุระหว่าง 13-14 ปี ความสามารถทางกลไกเฉพาะในกีฬาเทนนิส โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเร็วของเวลาปฏิกิริยา (reaction speed) และความคล่องแคล่วว่องไว กลายเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในด้านความสามารถของผู้เล่น จากนั้นเมื่อผู้เล่นมีอายุประมาณ 16 ปี (โดยปกติผู้หญิงจะต่ำกว่า 16 ปี) องค์ประกอบด้านความแข็งแรง กำลัง นอกจากนั้นความเร็วและความอดทนแบบแอนแอโรบิกจะทำหน้าที่ในการเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับสมรรถนะของผู้เล่น

3. องค์ประกอบด้านจิตวิทยา (Psychological Factors) การทดสอบทางด้านจิตวิทยาสามารถดำเนินการทดสอบได้ในหลายขอบเขต เช่น ความมั่นใจในตนเอง (self-confidence) ความชื่นชอบในตนเอง (self-esteem) บุคลิกภาพ (personality) หรือแรงจูงใจ (motivation) เป็นต้น ซึ่งการพัฒนาทักษะด้านความแข็งแรงเกร่งทางจิตใจเป็นส่วนที่สำคัญและสามารถพัฒนาได้ในนักกีฬาทุกคนอาจเป็นไปได้ว่า คุณลักษณะทางด้านจิตใจ คือ ส่วนที่สำคัญของการแสดงความสามารถด้านการเล่นที่ดีในขณะแข่งขัน ผู้เล่นที่มีคุณลักษณะดังกล่าวจะแสวงหาโอกาสที่จะแข่งขันและฝึกซ้อมทักษะของตนเอง ซึ่งถือเป็นแรงจูงใจที่มีอยู่โดยธรรมชาติของผู้เล่น นอกจากนี้ส่วนที่สำคัญในด้านอื่นๆ ของคุณลักษณะทางจิตวิทยา คือ ความมั่นใจ (Confidence) ความสามารถในการสร้างและการคงอยู่ของสมาธิ เมื่อต้องเผชิญหน้ากับความล้มเหลว (Ability to concentrate and persistence)

4. องค์ประกอบด้านเทคนิคและแทคติก (Technical/Tactical Factors) คุณลักษณะด้านเทคนิคและแทคติกของตัวบ่งชี้ผู้มีความสามารถพิเศษอาจจะเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมาก แต่ผู้ฝึกสอนจะต้องมีเครื่องมือในการประเมินที่ดีด้วย ในระยะเริ่มต้น (อายุประมาณ 7-10 ปี) เด็กควรอยู่ในระดับที่อยู่ในเกณฑ์เฉลี่ยในด้านการถือบอลและการถือไม้ เมื่อเด็กมีอายุประมาณ 12 ปี ควรมีการพิจารณาทักษะพื้นฐาน เช่น การเสิร์ฟ การตีโฟร์แฮนด์ การตีแบ็คแฮนด์ การวอลเลย์ และการตบลูก เมื่อผู้เล่นเติบโตขึ้นมาถึงระดับเยาวชน การรักษาทักษะพื้นฐานให้คงอยู่ระหว่างการแข่งขันในวงคະແນນที่มีความสำคัญ โดยผู้เล่นควรเพิ่มแรงในการตีลูกบอลในแต่ละครั้งตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการแข่งขัน เมื่อผู้เล่นเติบโตเต็มที่ ลูกเสิร์ฟ และการตีโฟร์แฮนด์ จะเป็นสิ่งสำคัญของความสามารถในการเล่นระดับสูงต่อไปผู้เล่นในระดับเยาวชนควรมีความสามารถในการฟุตเวิร์ค (footwork) ดีพอควรและความสามารถในการปรับเปลี่ยนแผนการเล่น เมื่อมีความแตกต่างของสถานการณ์ขณะทำการเล่น การเลือกใช้แทคติกในแต่ละสถานการณ์ในขณะแข่งขัน และการตัดสินใจที่ดี

5. องค์ประกอบด้านผลการแข่งขัน (Results Factors) ผู้ฝึกสอนไม่ควรใช้ตัวบ่งชี้การเป็นนักกีฬาเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษบนพื้นฐานของผลการแข่งขันในช่วงอายุต่ำกว่า 10 ถึง 12 ปี แต่เพียงอย่างเดียว เพื่อสนับสนุนความคิดเห็นดังกล่าวข้างต้นนั้น ประสบการณ์ในการเล่น ทักษะเทคนิค และการเจริญเติบโตทางชีววิทยาอย่างเต็มที่ คือ องค์ประกอบสำคัญในการกำหนดว่า ผู้ใดจะเป็นผู้ชนะในช่วงอายุนี้ ผู้เล่นที่มีแทคติกการเล่นที่ดีสามารถประสบความสำเร็จได้ในกลุ่มช่วงอายุนี้ เช่น การยืนด้านหลังเบสไลน์ (baseline) ที่ดีและตีได้อย่างนุ่มนวลโดยไม่ติดเหน็ด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ผู้เล่นจะต้องมีผลการแข่งขันอยู่ในระดับดีเป็นอย่างน้อยในแต่ละระยะของพัฒนาการ หรือกลุ่มอายุ เพื่อพิจารณาถึงการที่จะเป็นผู้เล่นที่ดีในอนาคต

6. องค์ประกอบที่ไม่สามารถจับต้องได้ (Intangibles Factors) คุณลักษณะด้านอื่นๆ ของตัวบ่งชี้การเป็นนักกีฬาเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษนั้นเป็นเรื่องที่ยากเกินกว่าจะอธิบาย และไม่สามารถบรรจุอยู่ในองค์ประกอบด้านสรีรวิทยา ด้านร่างกาย ด้านจิตวิทยา รวมถึงด้านเทคนิคและ

แทคติค ซึ่งตัวอย่างขององค์ประกอบที่ไม่สามารถจับต้องได้ประกอบด้วย สิ่งที่อยู่นอกเหนือความสามารถ การมีความรู้สึกที่ดีเมื่อมีลูกบอล (possessing good feeling for the ball) ความสามารถในการเป็นผู้ฝึกสอน (being coach able) ความสามารถในการปรับตัวเมื่อสภาพเปลี่ยนไป (adjusting well to different conditions) สัญชาตญาณนักฆ่า (killer instinct) การมีความสุขกับเกม (enjoying the game) การเล่นได้ดีในการแข่งขันที่สำคัญ (playing better in important matches) ความรักในการแข่งขัน (loving to compete) หรือการคาดหวังที่ดีเยี่ยม (great anticipation) หรือ ความรู้สึกเกี่ยวกับคอร์ต (court sense) เป็นต้น เมื่ออยู่ในเกมการแข่งขันระดับสูง องค์ประกอบที่ไม่สามารถจับต้องได้ คือสิ่งที่สำคัญอย่างมาก

ข้อเสนอแนะสำหรับตัวบ่งชี้การเป็นนักกีฬาเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษสิ่งที่สำคัญพื้นฐานสำหรับตัวบ่งชี้การเป็นนักกีฬาเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษ คือ การใช้การทดสอบทางวิทยาศาสตร์ควบคู่กับการสังเกตของผู้ฝึกสอน โดยมีองค์ประกอบทางวิทยาศาสตร์การกีฬาที่จะใช้ในการทดสอบ ทั้ง 6 องค์ประกอบโดยมีสัดส่วนในการให้คะแนนของตัวบ่งชี้การเป็นนักกีฬาเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษรุ่นอายุ 12 ปี ดังนี้

- ด้านเทคนิคและแทคติค	30	%
- ด้านร่างกาย	25	%
- ด้านจิตวิทยาและด้านที่ไม่สามารถจับต้องได้	20	%
- ด้านสรีรวิทยา	10	%
- ด้านผลการแข่งขัน	10	%
- ด้านนามธรรม “ความรู้สึกล้ำหาญ”	5	%

ท้ายที่สุดนักกีฬาในระดับเยาวชนไม่ควรถูกทำให้หมดกำลังใจในการเล่นเทนนิสเพียง แค่ว่าเขาทำผลการทดสอบออกมาได้ไม่ดี ดังนั้นจึงไม่ควรตัดสินใจเร็วเกินไปว่านักกีฬาคนใดเป็นนักกีฬาที่มีความสามารถพิเศษ นอกจากนั้นผู้ฝึกสอนที่มีสายตายอดเยี่ยมยังมีบทบาทหน้าที่ที่สำคัญของตัวบ่งชี้ นักกีฬาเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษและถือเป็นข้อมูลสำคัญในการช่วยให้ผู้ฝึกสอนทำงานได้ง่ายขึ้น

### ปัจจัยความสำเร็จในการเสิร์ฟลูกเทนนิสและโมเดล

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า

ภาสกร วัฒนธาดาและคณะ (2548) ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟกับระดับความสูงบริเวณหน้าแร็กเกตที่กระทบกับลูกเทนนิส โดยจำลองการแข่งขันแมทช์ประเภทชายเดี่ยว จากนักเทนนิสชายที่อยู่ในอันดับที่ 23 และ 27 ลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ จำนวน 2 คน พบว่านักเทนนิสเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 110 และ 89 ไมล์ต่อชั่วโมง เรียงตามลำดับ เพอร์เซ็นต์การเสิร์ฟของลูกแรกของนักเทนนิส

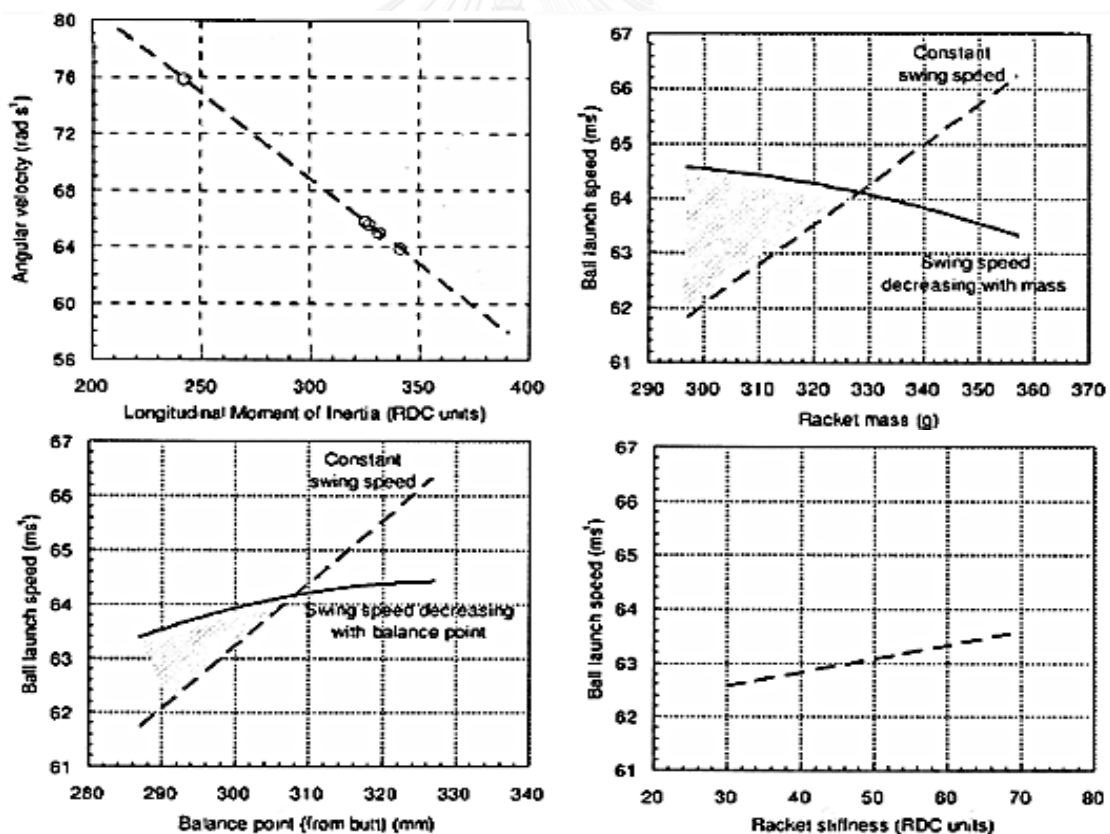
ทั้ง 2 คน คือ 43% และ 41% ระดับความสูงลูกเทนนิสขณะกระทบหน้าแร็กเกตทั้งลูกแรกและลูกที่สองเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20-22 นิ้ว เนื่องจากบริเวณข้อมือขวา โดยลูกแรกจะอยู่สูงกว่าลูกที่สอง โดยเฉลี่ยประมาณ 1 นิ้ว ระดับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟและตำแหน่งที่ลูกกระทบหน้าแร็กเกต พบว่าอยู่ในระดับต่ำ ยกเว้นระดับความสัมพันธ์ของลูกเสิร์ฟแรกของนักเทนนิสคนแรกที่มีค่า 0.50 ซึ่งถือว่าสูงสำหรับตัวแปรทั้งสองในสภาพการแข่งขัน

Chow et al. (2003) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองจากนักเทนนิสชาย 4 คน และหญิง 4 คน ในการแข่งขันเทนนิสประเภทเดี่ยวในกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า ปี ค.ศ. 1996 พบว่าการเสิร์ฟลูกแรกนั้นมีความเร็วของลูกเสิร์ฟมากกว่าการเสิร์ฟลูกที่สองถึง 24.1 % ในประเภทชายเดี่ยว โดยความเร็วของลูกเสิร์ฟลูกแรกต่อลูกที่สอง เท่ากับ  $50.33$  vs.  $37.80$   $\text{ms}^{-1}$ ,  $p < 0.01$  และในประเภทหญิงเดี่ยว (ความเร็วของลูกเสิร์ฟลูกแรกต่อลูกที่สอง เท่ากับ  $42.06$  vs.  $32.70$   $\text{ms}^{-1}$ ,  $p < 0.01$ ) ยังพบอีกว่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยวและในประเภทหญิงเดี่ยว เท่ากับ  $38.57$   $\text{ms}^{-1}$  และ  $30.81$   $\text{ms}^{-1}$  รวมถึงความเร็วลูกเทนนิสก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยวและในประเภทหญิงเดี่ยว เท่ากับ  $3.86$   $\text{ms}^{-1}$  และ  $4.12$   $\text{ms}^{-1}$  เรียงตามลำดับ

Donoghue & Ballantyne (2004) กล่าวถึงปัจจัยความสำเร็จในการเสิร์ฟของนักเทนนิสมือขวามือประกอบอยู่หลายอย่างเช่นกัน ซึ่งจากการศึกษาวิจัยโมเดลทางคณิตศาสตร์ (mathematics model) ของ Gale เมื่อปี 1971 มาทำการวิเคราะห์เกมการแข่งขันในทุกๆระดับเป็นที่ยอมรับกันแล้วว่า ลูกเสิร์ฟเป็นการตีลูกที่ทำให้ผู้เล่นได้เปรียบผู้เล่นฝ่ายตรงกันข้าม เพราะลูกที่เริ่มเล่นของการแข่งขันในแต่ละแต้ม ผู้เสิร์ฟสามารถที่จะควบคุมการเสิร์ฟ ไม่ว่าจะเป็นความเร็ว การหมุนของลูก และตำแหน่งที่ต้องการให้ลูกตกลงในคอร์ตเสิร์ฟ ผลของความเร็วของการเสิร์ฟลูกเทนนิสประเภทชายเดี่ยวและหญิงเดี่ยวทั้ง 4 รายการ ได้แก่ ออสเตเรียเลียโอเพ่น เฟรนช์โอเพ่น วิมเบิลดัน ยูเอสโอเพ่น ในปี 2002 รวม 569 แมทช์การแข่งขัน พบว่าในประเภทชาย เมื่อผู้เสิร์ฟสามารถเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองลง ผู้เสิร์ฟลูกแรกจะมีโอกาสทำคะแนนเฉลี่ยสูงถึง 68-74 % ซึ่งมากกว่า ผู้เสิร์ฟลูกที่สองลง (56-58%) ส่วนในประเภทหญิง เมื่อผู้เสิร์ฟสามารถเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองลง ผู้เสิร์ฟลูกแรกจะมีโอกาสทำคะแนนเฉลี่ยสูงถึง 60-66% และมากกว่าผู้เสิร์ฟลูกที่สองลง (51-54%) เช่นกัน จากข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นชัดเจนว่า โดยทั่วไปผู้เสิร์ฟจะเป็นฝ่ายที่ได้เปรียบในการแข่งขันในแต่ละแต้ม โดยเฉพาะในการเสิร์ฟลูกแรก

Haake et al. (2007) พบว่า ขณะตีโพรแอนด์ที่ใช้ความเร็วไม้แร็กเกตต่ำ หรือขณะวางไม้เพื่อรับ จุดกระทบในการกระเด็นหรือความเร็วของลูกเทนนิสจะมากที่สุด (maximize ball rebound velocity) จะอยู่บริเวณใกล้คอของไม้ (racket throat) อย่างไรก็ตามตำแหน่งจุดกระทบที่ทำให้ลูกเกิดความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดเปลี่ยนแปลงได้เมื่อความเร็วของไม้แร็กเกตเพิ่มขึ้นมากๆ อาทิเช่นในขณะที่เสิร์ฟลูก (serve) จุดกระทบที่ทำให้เกิดความเร็วของลูกเทนนิสจะมากที่สุดจะย้ายมาอยู่บริเวณปลายหัวไม้แร็กเกต (racket tip) ซึ่งจาก ค.ศ. 1870s ถึง 2007 ความเร็วของลูกเทนนิสในขณะเสิร์ฟ (serve speed)

เพิ่มขึ้น 17.5 %หรือเพิ่มขึ้น  $9.70 \text{ ms}^{-1}$  โดยสามในสี่ส่วนที่เพิ่มความเร็วลูกอยู่ในช่วง 1970s ทั้งนี้ยังพบว่า ถ้าจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตต่างกันเพียง 20 มิลลิเมตร หรือ 2 เซนติเมตร จะทำให้ลูกเทนนิสตกลงพื้นต่างกันถึง 1.45 เมตร และถ้าจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตต่างกันเพียง 5 เซนติเมตร จะทำให้ลูกเทนนิสตกลงพื้นต่างกันมากถึง 4.00 เมตร พบอีกว่าโมเดลที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสดังกล่าวที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากคอมพิวเตอร์ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณจากโมเดลเช่นกัน ได้แก่ ตัวแปรค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket;  $\text{rad.s}^{-1}$ ) ค่าความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต (Stiffness of racket; RDC Unit) และน้ำหนักการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (Swing weight of racket; RDC Unit) มีสหสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความเร็วของลูกเทนนิสหลังเข้ากระทบ (Ball launch speed;  $\text{m.s}^{-1}$ ) และค่าตำแหน่งจุดกระทบที่ได้จากระยะห่างจากปลายหัวไม้แร็กเกตถึงตำแหน่งที่เข้ากระทบ (mm) เรียงตามลำดับ รวมถึงความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (Brower, Cross, 2005: String tension; lbs) แต่มีค่าผกผันในทางตรงกันข้ามกับค่าความเร็วของลูกเทนนิสหลังเข้ากระทบ



รูปที่ 5 แสดงค่าตัวแปรสำคัญต่างๆที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความเร็วของลูกเทนนิสหลังเข้ากระทบ (Haake et al., 2007)

## โมเดลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้านวิศวกรรมศาสตร์การกีฬา (Model in Sports Engineering)

การศึกษาโมเดลการทดสอบด้านวิศวกรรมศาสตร์การกีฬา เป็นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโมเดลในห้องปฏิบัติการ อาทิเช่น โมเดลทางคณิตศาสตร์ (mathematics model) โมเดลการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation model: solidwork) รวมถึงโมเดลที่คำนวณค่าพารามิเตอร์ของไม้แร็กเกตที่สามารถแบ่งแยกออกเป็นส่วนย่อย (finite element: FE model) เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาถึงผลของโครงสร้างและความถี่จากแรงสั่นภายในไม้แร็กเกต (modal frequency and shape of racket frame) โดยผู้วิจัยได้รวบรวมผลการศึกษารูปแบบโมเดลที่น่าสนใจดังนี้

Gale (1971) ได้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์ (mathematics model) ในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับโอกาสการทำคะแนนจากความสามารถเสิร์ฟทั้งลูกแรกและลูกที่สอง โดยอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการเสิร์ฟเทนนิสครั้งแรกมีสมการได้แก่  $P = p_1 \cdot q_1 + (1-p_1) \cdot p_2 \cdot q_2$  โดย P คือโอกาสการทำคะแนนในการเสิร์ฟที่จะชนะ (probability of the serving player winning a point) และ  $p_1, q_1, p_2, q_2$  คือเงื่อนไขในโอกาสการทำคะแนน (conditional probabilities of the point being won) และตั้งชื่อสมการว่า Gale's model

Casolo & Ruggieri (1991) ได้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์ (mathematics model) เกี่ยวกับการกระทบลูกเทนนิสและไม้แร็กเกตโดยศึกษาผลการเคลื่อนที่ของลูกแบบต่อเนื่องจากการทดลอง (experimental study) ในห้องปฏิบัติการ เพื่ออธิบายการส่งแรงในแต่ละข้อต่อของแขนต่างๆ ของนักกีฬาไปถึงไม้เทนนิสในมือที่จับและคำนวณความเร็วของลูกและไม้แร็กเกตหลังกระทบจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังกล่าว อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการศึกษาเรื่องการหมุน/สปินของลูกเทนนิส

Cross (1998) ได้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (vibration node) ในการกระทบลูกและไม้เทนนิสว่าเป็นตำแหน่งจุดกระทบที่ทำให้ลูกมีความเร็วสูงสุดที่ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (sweet spot: the first sweet spot) หรือตรงกลางหน้าไม้ในขณะตีลูกโฟร์แฮนด์และแบ็คแฮนด์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

Gu & Li (2007) ได้นำเสนอโมเดลการคำนวณจากคอมพิวเตอร์ (computer simulation model: solidwork) โดยศึกษาแบบแบ่งเป็นส่วนย่อย (finite element method) เกี่ยวกับการกระทบลูกเทนนิสและไม้ เพื่อวิเคราะห์หาความสั่นสะเทือนและรูปร่างการบิดตัวของไม้เทนนิส (modal frequency and shape) หรือในนักกีฬาเรียกว่าความแข็งและดัดตัวของไม้แร็กเกต (spring stiffness) พบว่าแรงสั่นสะเทือนของไม้เทนนิสในการยึดติด (fixed grip condition of racket) ขณะทดสอบมีค่าน้อยกว่าการปล่อยแบบอิสระ (free condition) รวมถึงการสั่นของเอ็นบนหน้าไม้เทนนิส (string's vibration) ในทั้งสองลักษณะในการยึดไม้เทนนิส



Maeda et al. (2000) ได้นำเสนอโมเดลและการทดลองทางกายภาพ (model's simulation and physical experiment) เกี่ยวกับการกระทบลูกและไม้เทนนิส เพื่อทดสอบหาการใช้งานได้ (validity) จากโมเดลในห้องปฏิบัติการ 3 จุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิดพบว่าตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (sweet spot) นั้น ค่าแรงสั่นสะเทือนน้อยลง แต่ยังคงมีความสั่นสะเทือนจากคลื่นความถี่สูงอยู่ (high frequency)

Glynn King & Mitchell (2010) ได้นำเสนอโมเดลการคำนวณจากคอมพิวเตอร์ (computer simulation model หรือ visco-elastic ball model) เกี่ยวกับการกระทบลูกเทนนิสและไม้ โดยวิเคราะห์ตำแหน่งจุดกระทบแบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ 9 จุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิดจำนวน 24 ความยืดหยุ่น/สปริงของเอ็นที่ซิง (visco-elastic springs) เพื่ออธิบายการเกิดและส่งแรงในแต่ละจุดในขณะลูกกระทบไม้เทนนิสรวมถึงผลจากความแข็งแรงแรงและการติดตัวของไม้แรกเกิด และความยืดหยุ่น/สปริงจากความตึงของการขึ้นเอ็นบนหน้าไม้เทนนิส

Allen et al. (2010) ได้นำเสนอโมเดลที่สามารถคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากคอมพิวเตอร์โดยแบ่งโมเดลของไม้แรกเกิดออกเป็นส่วยย่อย (finite element: FE model: Ansys/ LS-DYNA10.0) จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory study) เกี่ยวกับการกระทบลูกเทนนิสและไม้ ซึ่งเป็นการศึกษาเฉพาะกรณีโดยใช้ไม้แรกเกิด ทดสอบการใช้งานได้ (validity) จากโมเดลกับการใช้เครื่องทดสอบจากสหพันธ์นานาชาติเทนนิส (ITF: International Tennis Federation) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย (root mean squared error) เท่ากับ  $1 \text{ m.s}^{-1}$  ณ ความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบ เท่ากับ  $40 \text{ m.s}^{-1}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

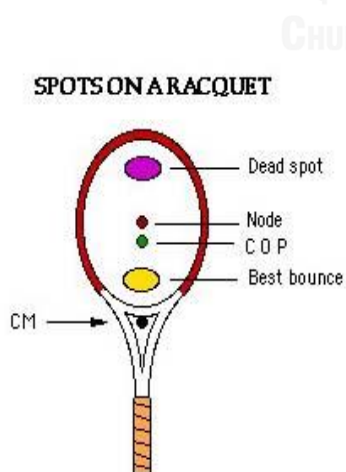
### โมเดลที่นำมาใช้งานด้านเทคโนโลยีการกีฬาในกีฬาเทนนิส (Model in Sports Technology)

การศึกษาโมเดลที่มุ่งเน้นนำผลมาใช้งานด้านเทคโนโลยีการกีฬาในกีฬาเทนนิส เป็นโมเดลเกี่ยวกับการศึกษาจากประสบการณ์ในสภาวะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) อาทิเช่น การศึกษาในสนามขณะแข่งขันกีฬา เป็นต้น ทั้งนี้การควบคุมปัจจัย หรือตัวแปรต่างๆทำได้ยากกว่า การศึกษาในห้องปฏิบัติการและมีความเชื่อมั่นน้อยกว่า แต่โมเดลนี้สามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้โดยตรงและอธิบายสิ่งต่างๆในเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนี้

Brody & Cross (2002) ได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการเสิร์ฟเทนนิสครั้งแรก โดยใช้โมเดลการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวด้วยกล้องที่สามารถบันทึกภาพได้ 100 ภาพต่อวินาที จากนักกีฬา พบว่าลูกเสิร์ฟที่มีความเร็ว  $45 \text{ ms}^{-1}$  (162 km/hr หรือ 100 mile/hr) เกิดขึ้นจากรีบกกระทบลูกที่ตำแหน่งบนเอ็นที่มีความเร็ว  $35 \text{ ms}^{-1}$  (126 km/hr หรือ 79 mile/hr) มีสมการได้แก่  $V = (1+e_A) V_p$  โดย  $V$  คือ ความเร็วลูกเสิร์ฟเทนนิส  $V_p$  คือ ความเร็วแรกเกิดที่ตำแหน่งกระทบลูกเทนนิสและ  $e_A$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (apparent coefficient of restitution) ในที่มีค่าเท่ากับ 0.29 และจะมีค่าประมาณ 0.4 ที่

กลางหน้าไม้แรกเกิดเทนนิสจากห้องปฏิบัติการด้วยการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบหน้าไม้ที่แขวนในแนวตั้ง และติดเครื่องมือวัดแรงสั่น เพื่อคำนวณหาจุดที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (first sweet spot) ซึ่งลักษณะการกระทบจากการยิงลูกเทนนิสที่มีความเร็วเข้าหาไม้เทนนิสคล้ายกับการวางไม้ในขณะที่รับลูกเทนนิสจากคู่ต่อสู้เพื่อตีโต้กลับ หรือการตีโฟร์แฮนด์และการตีแบ็คแฮนด์ที่ความเร็วของไม้แรกเกิดอยู่ในระดับต่ำ ทั้งนี้ ผลที่แสดงออกของการกระทบดังกล่าว น่าจะแตกต่างกับการเสิร์ฟลูกของนักกีฬาเทนนิส เนื่องจากความเร็วของไม้ในขณะที่กระทบลูกนั้น ไม้แรกเกิดมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมากเพื่อเข้าตีกระทบลูกที่เกือบจะหยุดนิ่งในขณะที่เสิร์ฟซึ่งตรงกันข้ามกับในกรณีแรก

Cross (2006) ได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration node) ในขณะออกแรงตี หรือขณะรับลูก ว่าเป็นตำแหน่งจุดกระทบที่ทำให้ลูกมีความเร็วสูงสุดที่ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (sweet spot : the first sweet spot) หรือตรงกลางหน้าไม้ ในขณะที่ตีโฟร์แฮนด์และแบ็คแฮนด์ (Cross, 1998) และสร้างเฟรมอ้างอิงในการทดลอง (frame of reference) ในห้องปฏิบัติการตั้งรูปด้านข้างทั้งนี้ยังอธิบายเพิ่มเติมถึงตำแหน่งจุดสมดุลขณะลูกกระทบบนเอ็นหน้าไม้โดยไม่เกิดแรงกระตุก (center of percussion, COP : the 2<sup>nd</sup> sweet spot) และทำให้ลูกมีความเร็วสูงมากเช่นกันแต่อาจจะมีแรงสั่นบ้างเพียงเล็กน้อย หรือขณะวางไม้เพื่อรับลูก ซึ่งจุดกระทบอยู่ที่ตำแหน่งต่ำกว่าจุดกลางหน้าไม้ลงมาตั้งรูป ทั้งนี้เมื่อยึดไม้แรกเกิดให้หนึ่งอยู่กับ จุดกระทบในการกระเด็นของลูกเทนนิสจะมากที่สุด (best bounce) ซึ่งอยู่บริเวณใกล้คอของไม้ อย่างไรก็ตาม จุดกระทบที่ทำให้ลูกเกิดความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดอาจจะเปลี่ยนแปลงได้เมื่อความเร็วของไม้แรกเกิดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อาทิเช่นในขณะที่เสิร์ฟลูก (serve) หรือการวอลเลย์ตบลูก (smash) เป็นต้น โดยมีแนวโน้มจะอยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้ขึ้นไปทางหัวไม้แรกเกิดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น (swing weight of racket) ขณะการ



ออกแรงตีว่ามีค่าเพิ่มขึ้นมากเท่าไร ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุและรูปแบบโครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์ของไม้แรกเกิดแต่ละยี่ห้อที่มีรูปแบบแตกต่างกันไป ดังนั้นนักกีฬาจะต้องออกแรงมากพอเพื่อให้ไม้เทนนิสมีความเร็วเพิ่มขึ้นและสามารถเอาชนะแรงเฉื่อยนี้ ซึ่งจะส่งผลต่อทั้งตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ และการทำให้ลูกเทนนิสเกิดความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงใด และได้นำเสนอจุดกระทบเฟรมอ้างอิงไม้เทนนิส (Frame of reference หรือ CM: Center of Mass) ในห้องปฏิบัติการ

**รูปที่ 6** แสดงตำแหน่งจุดกระทบต่างๆบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration node) ในขณะออกแรงตีที่ตรงกลางหน้าไม้ และจุดกระทบในการกระเด็นของลูกเทนนิสมากที่สุด (best bounce) ในห้องปฏิบัติการ (Cross, 2006)

Choppin (2008) ได้นำเสนอโมเดลรูปแบบการกระทบบนหน้าไม้ในการตีลูกโฟร์แฮนด์ (forehand shot) แบบ 3 มิติ จากนักกีฬาและห้องปฏิบัติการโดยการยึดไม้แร็กเก็ตบริเวณหัวไม้ติดไว้กับที่ (freely suspending a racquet) และยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบ ซึ่งเป็นวิธีการยึดไม้แบบใหม่ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ และแสดงให้เห็นว่าสามารถทำนายการเคลื่อนที่ของลูกเทนนิสหลังกระทบได้ดียิ่งขึ้นโดยการคำนวณหาค่าความเร็วของลูกในการตีลูกโฟร์แฮนด์และแบล็คแฮนด์ รวมถึงการทำให้เกิดการหมุน/ การสปินของลูกเทนนิส (ball spin) ด้วย ทั้งนี้ในงานวิจัยยังได้มีความร่วมมือกับสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (International Tennis Federation: ITF)



**รูปที่ 7** แสดงวิธีการยึดไม้แร็กเก็ตแบบใหม่ที่ปลายหัวไม้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาโมเดลรูปแบบการเข้ากระทบบนหน้าไม้ในการตีลูกโฟร์แฮนด์ แบบ 3 มิติ จากนักกีฬาและผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Choppin, 2008)

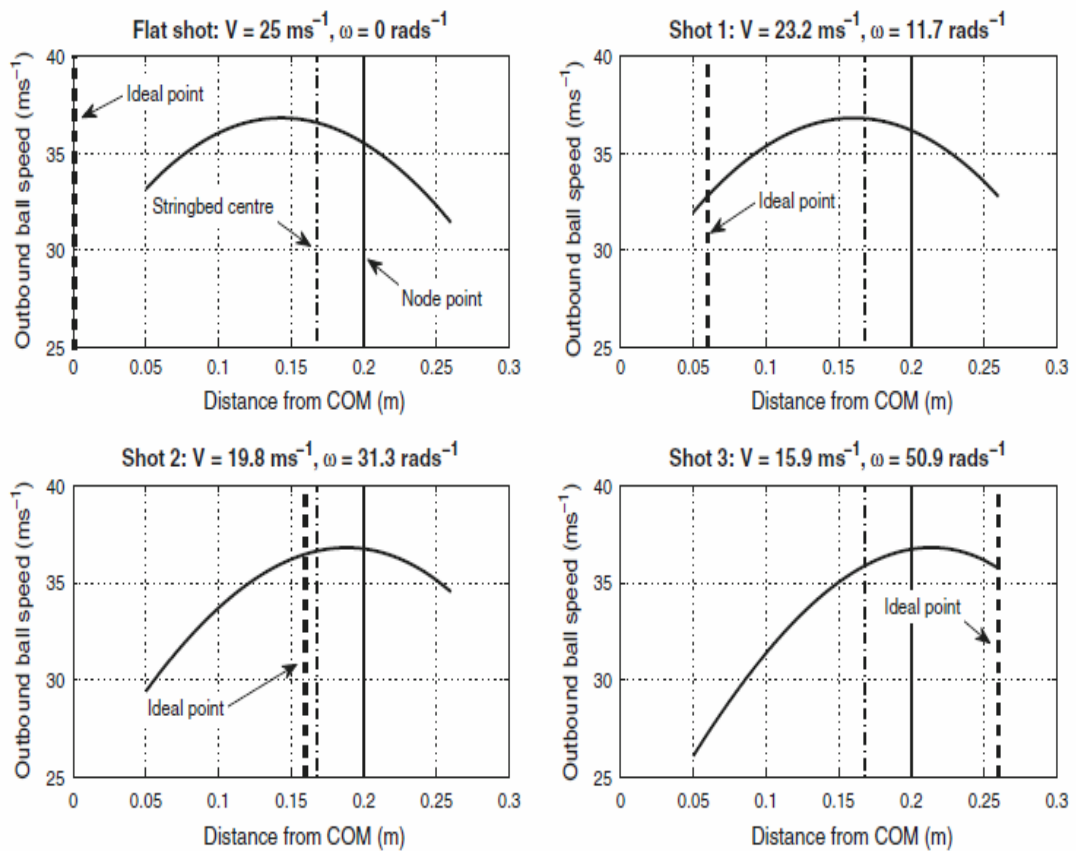
Allen et al. (2011) ได้นำเสนอโมเดลที่สามารถคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากคอมพิวเตอร์โดยแบ่งโมเดลของไม้แร็กเก็ตแกตออกเป็นส่วย่อย (finite element: FE model) จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory study) เกี่ยวกับการกระทบลูกเทนนิสและไม้โดยการจำลองจากการตีลูกกรานด์สโตรก (groundstroke) และศึกษาจุดกระทบในห้องปฏิบัติการตามเฟรมอ้างอิงไม้เทนนิส (frame of reference) ข้างต้น เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของลูกเทนนิสและการบิดตัวของไม้แบบต่อเนื่อง ทั้งนี้สามารถอธิบายถึงการส่งแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ลูกกระทบไม้ และการหมุน/สปินของลูกเทนนิสด้วย พบว่า ความเร็วของลูกเทนนิสในการตีลูกกรานด์สโตรก อาทิเช่นในขณะที่ตีโฟร์แฮนด์ที่ใช้ความเร็วไม้แร็กเก็ตต่ำ มีผลทำให้ลูกเทนนิสหลังการกระทบมีความเร็วสูงสุดในตำแหน่งบริเวณใกล้คอไม้เทนนิส (0, -60) รองลงมาคือ ตำแหน่งจุดกระทบกลางหน้าไม้ (sweet spot: 0, 0) ทั้งนี้ถ้าค่าความแข็งแกร่งของไม้แร็กเก็ตมาก (high structural stiffness racket) มีผลต่อความเร็วของลูกเทนนิสการตีลูกกรานด์สโตรก โดยส่งผลทำให้ลูกเทนนิสหลังการกระทบมีความเร็วมากขึ้น 9% และถ้าค่าหัวไม้ที่มี

น้ำหนักมากขึ้น ส่งผลทำให้ลูกเทนนิสหลังการกระทบมีความเร็วเพิ่มขึ้น 37% และยังสามารถทำให้การหมุน/สปินของลูกเทนนิสเพิ่มขึ้น 23% ในขณะที่ลูกแรนดส์สะโตกด้วย

Choppin et al. (2011) ได้ศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะของการกระทบระหว่างลูกและไม้เทนนิสในรายการแข่งขันทดสอบคุณสมบัติเพื่อวิมเบิลดัน (the Wimbledon qualifying tournament) โดยการวิเคราะห์การกระทบของลูกและไม้ในการตีลูก จำนวน 106 ลูกจากนักกีฬาชั้นนำระดับนานาชาติ จำนวน 16 คน พบว่าในการตีลูกโฟร์แฮนด์ (forehand drive) ของนักกีฬาส่วนใหญ่ลูกเทนนิสเข้าตรงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (the node point) มากที่สุด โดยพบว่าความเร็วของลูกจากการตีโฟร์แฮนด์ของนักกีฬาชายมากกว่าความเร็วของลูกจากนักกีฬาหญิงเท่ากับ 9.4 % ซึ่งในนักกีฬาหญิงสามารถตีลูกโฟร์แฮนด์ที่ความเร็วเฉลี่ย เท่ากับ  $33.9 \text{ ms}^{-1}$  จากการใช้กล้องความเร็วสูง 1,000 ภาพต่อวินาที 2 ตัว (two Phantom V4.2 high speed video cameras: 1,000 frames per second) และค่าการหมุน/การสปินของลูกเทนนิสจากการใช้โมเดลในการทำนายพบว่านักกีฬาชายสามารถตีลูกสปินมากกว่านักกีฬาหญิง 22.3 % ณ ความเร็วรอบ 1,480 รอบต่อนาที (rpm) ทั้งนี้จากการศึกษาครั้งนี้เป็นการยืนยันผลการวิจัยโมเดลที่ใช้ทำนายของนักกีฬาในการตีลูกโฟร์แฮนด์ที่เคยนำเสนอมาก่อน

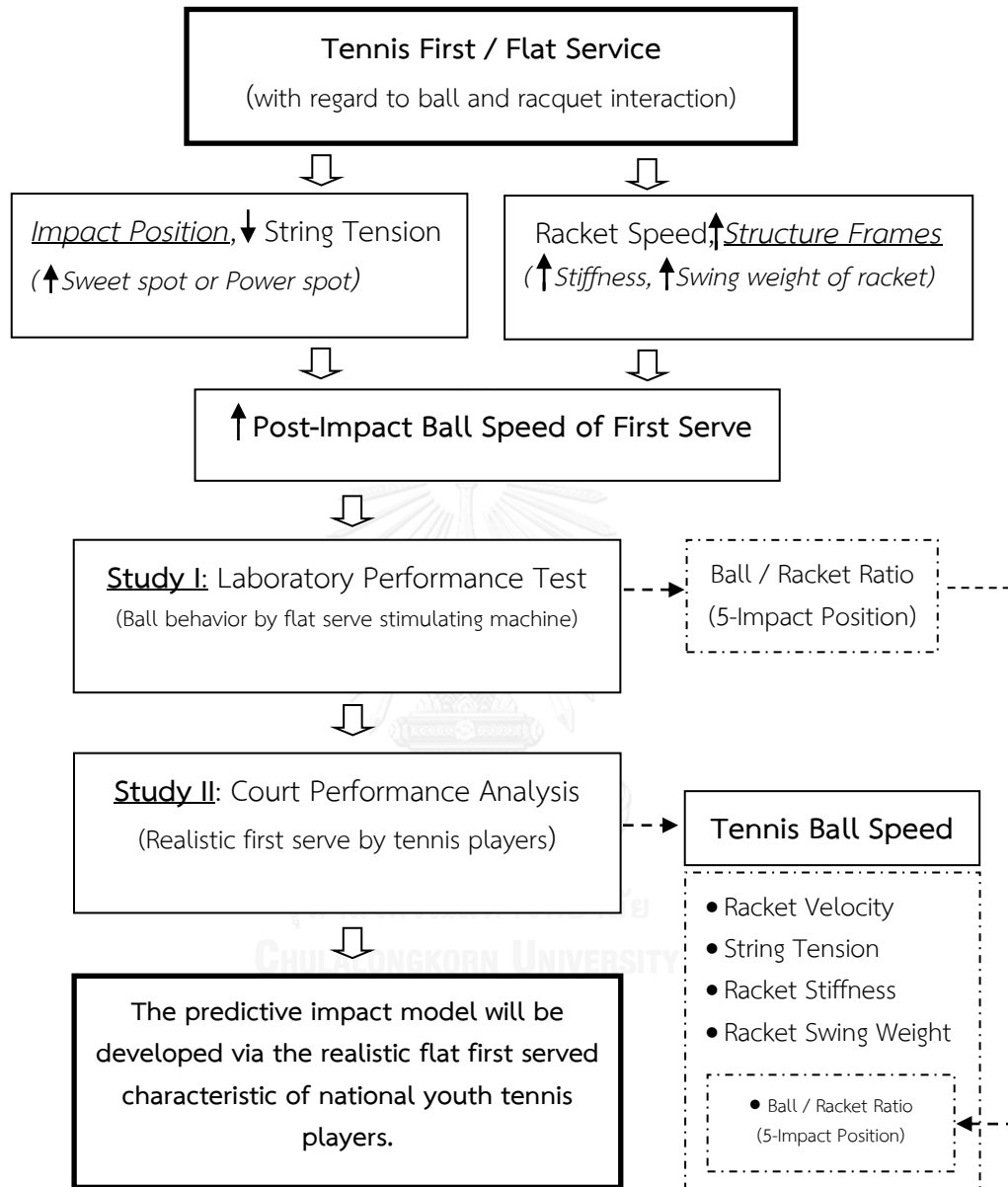
Choppin (2013) ได้ศึกษาถึงความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจากโมเดลที่ใช้ทำนายและการทดลองในห้องปฏิบัติการ กล่าวว่าในการวิจัยเพื่อพิสูจน์ตำแหน่งจุดกระทบจากการเสิร์ฟลูกแรก (first serve) หรือลูกแฟล็ต (flat serve) ด้วยวิธีการเสิร์ฟลูกโดยตรงจากนักกีฬา หรือจากเครื่องทดสอบ (real strike) ในห้องปฏิบัติการ ปัจจุบันมีรายงานศึกษาวิจัยดังกล่าวน้อยมาก เพราะมีข้อจำกัดในการทดลองหลายประการ ทั้งในตัวนักกีฬาที่ไม่สามารถเสิร์ฟลูกให้ตรงตำแหน่งจุดกระทบที่ต้องการซ้ำๆ ได้ทุกครั้ง หรือจากเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยที่สร้างแบบจำลองการเสิร์ฟลูกด้วยการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบไม้แร็กเกตที่เป็นการศึกษาผลของรูปแบบโครงสร้าง (modal shape of racket frame) อาทิเช่นการยิงลูกเทนนิสเข้ากระทบหน้าไม้ที่แขนในแนวตั้งและติดเครื่องมือวัดแรงสั่น (Cross, 1998) เพื่อคำนวณหาจุดที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (first sweet spot: vibration node) ทั้งนี้แตกต่างกับการเสิร์ฟลูกแฟล็ตที่ไม้เทนนิสมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมากเพื่อเข้ากระทบลูกเทนนิสที่เกือบจะหยุดนิ่งในขณะที่เสิร์ฟจริง ซึ่งจุดกระทบที่ทำให้เกิดความเร็วลูกสูงสุดน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเดิม เพราะเนื่องมาจากมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาร่วมด้วยอย่างเช่นความเร็วไม้แร็กเกตที่สูงมาก แรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น (moment of inertia) และแรงส่งที่เข้ากระทบกัน (momentum) เป็นต้น และเรียกชื่อจุดกระทบนี้ว่า “Power point” (Head, 1976) ซึ่งถ้าความเร็วไม้แร็กเกตที่ต่ำอย่างเช่นการตีลูกโฟร์แฮนด์ (forehand shot) จุดพลังกระทบจุดนี้จะอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (node point) ซึ่งอยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้ (Geometric String-bed Center; GSC) ประมาณ 28 มม. (0.028 เมตร) ขณะความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกตเท่ากับ 40.0 องศาต่อวินาที ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) แต่ถ้าความเร็วไม้แร็กเกตสูงมากเช่นการเสิร์ฟลูกแรก

(first serve) จุดพลังกระทบจุดนี้ น่าจะเคลื่อนที่ไปไกลปลายไม้แรกแก๊ตที่อยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้ ประมาณ 50 มม. (0.050 เมตร: จุดที่เกิดความเร็วสูงสุดในเส้นกราฟ) ขณะความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของไม้แร็กเกต เท่ากับ 50.9 องศาต่อวินาที หรือความเร็วของไม้แร็กเกตประมาณ 36.8 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) แต่ถ้าความเร็วไม้แร็กเกตสูงมากขึ้นไปอีก จุดพลังกระทบมีโอกาสจะเคลื่อนไปไกลปลายไม้แรกแก๊ตเหนือจุดกลางหน้าไม้ได้ถึงประมาณ 85 มม. (Ideal point: เส้นปะหน้าในแนวตั้งขวามือสุดในรูปกราฟล่างด้านขวา)



**รูปที่ 8** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลูกเทนนิส (Outbound ball speed) ระยะห่างของจุดหมุนไม้แร็กเกต (Distance from COM) และความเร็วที่เข้ากระทบ (Impact speed) เพื่อคำนวณหาความเร็วลูกสูงสุด (Power point) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเคลื่อนที่ ตามค่าความเร็วของหน้าไม้แร็กเกต (Choppin, 2013)

กรอบแนวคิดในการวิจัย



กรอบแนวความคิดในการวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นการศึกษาเฉพาะตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (max ball speed spot) ในขณะที่เสิร์ฟลูกแรก (first serve) หรือลูกแฟลท (flat serve) จากนักกีฬาเยาวชนทีมชาติ เพื่อให้การเข้ากระทบลูกเทนนิสมีสถานะเป็นจริงคล้ายการแข่งขันมากที่สุด ซึ่งเป็นการศึกษาโมเดลจากประสบการณ์ในสถานะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) โมเดลนี้จึงน่าจะสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์และอธิบายได้โดยตรง แต่ไม่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยด้านทักษะเทคนิคในการส่งแรงจากตัวนักกีฬา และใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (standardization: ratio data) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการ มาใช้ประกอบในการสร้างโมเดล/สมการถดถอยในขั้นตอนที่สอง เนื่องจากเป็นข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการเสิร์ฟของนักกีฬา ทั้งนี้เพื่ออธิบายถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบเอ็นหน้าไม้เทนนิสในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ รวมถึงการแสดงออกของลูกเมื่อถูกกระทบ (ball behavior) แล้วนำมาเป็นข้อมูลตัวแปรอิสระนี้ (ball and racket ratio of 5 impact positions) ประกอบร่วมในการสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรกหรือลูกแฟลทของนักกีฬา ทั้งนี้ ในการวิจัยโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลทครั้งนี้ จะทำให้นักเทนนิสสามารถเลือกใช้ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์กีฬา เพื่อการฝึกซ้อมและแข่งขันได้เหมาะสมสำหรับตนเองเพิ่มความสามารถในการเสิร์ฟลูกแรกได้อย่างมีประสิทธิภาพและรุนแรงดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการสร้างความได้เปรียบทางการกีฬาอย่างถูกต้องตามกติกาและจริยธรรม รวมถึงสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (International Tennis Federation: ITF) น่าจะนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ทำนายค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟแรกของนักกีฬาขณะแข่งขันได้แม่นยำยิ่งขึ้น

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาเชิงปริมาณแบบการวิจัยกึ่งทดลอง (quasi experimental design) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ จากนักกีฬาเยาวชนเทนนิสทีมชาติ โดยการวิเคราะห์ภาพเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ ทั้งนี้ใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (Smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบ มาประกอบรวมในโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบ เนื่องจากมีข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้โดยตรง จากการเสิร์ฟของนักกีฬา ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอขั้นตอนในการวิจัย แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** เพื่อศึกษาถึงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่มีผลต่ออัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศ รวม 3 รูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ (สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงรี) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตอันใหม่รุ่นเดียวกันกับที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาตินิยมใช้ เพื่ออธิบายกลไกการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องแบบ 3 มิติ ขณะลูกเทนนิสเข้ากระทบเอ็นบนหน้าไม้ ณ ตำแหน่งจุดกระทบที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความเร็วของลูกเทนนิสในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ และในแต่ละรูปแบบโครงสร้างของไม้แร็กเกต

#### กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย เป็นผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศอันใหม่และเป็นรุ่นเดียวกับที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาตินิยมใช้ ซึ่งได้จากการเลือกตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) รวม 3 รูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ (สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงรี)

#### เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเข้าร่วมการวิจัย

1. เป็นผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศอันใหม่ และเป็นรุ่นเดียวกับที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาตินิยมใช้เพื่อการแข่งขันในระดับนานาชาติ
2. มีรูปแบบโครงสร้างของหน้าไม้แร็กเกตเป็น 1 ใน 3 จากรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ที่กำหนดคือ หน้าไม้แร็กเกตแบบสี่เหลี่ยม แบบสามเหลี่ยม และแบบวงรี โดยเลือกตัวอย่างแบบเจาะจงอย่างละ 1 รูปแบบโครงสร้าง



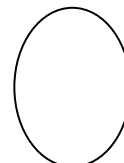
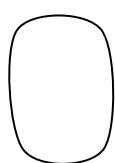
### เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างออกจากการวิจัย

ในกรณีที่เกิดเหตุสุดวิสัยเนื่องมาจากมีการแตกหักของผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศตัวอย่างระหว่างทดสอบ และไม่สามารถหาไม้แร็กเกตรุ่นเดียวกัน จะดำเนินการโดยเปลี่ยนรุ่นใหม่ที่เทียบเคียงกันได้มาใช้ทดแทน

### ขั้นตอนในการวิจัย

1. คัดเลือกตัวอย่างไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศแบบเจาะจง เป็นตัวแทนที่ใช้ทดลองในแต่ละรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกต ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 รูปแบบโครงสร้างหลักคือ รูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม (RR: Rectangular Racket), สามเหลี่ยม (RT: Triangular Racket) และวงรี (RO: Oval Racket) โดยโครงสร้างหน้าไม้ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง มีลักษณะที่แตกต่างกันไป แต่มีหน้าไม้ด้านซ้าย-ขวา สมดุลกัน (symmetry) ดังรูปที่ 9 โดยรูปแบบโครงสร้างของหน้าไม้แร็กเกตที่ใช้ในการวิจัย เป็นไปตามแต่ละผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกต ซึ่งเป็นการเลือกแบบเฉพาะเจาะจง ดังภาคผนวก ข นำมาขึ้นเอ็นชนิดเดียวกัน และกำหนดความตึงของเอ็นที่ขึ้นบนหน้าไม้แร็กเกต เริ่มต้นเท่ากันที่ 60 ปอนด์ ในระหว่างการศึกษาทดลองนี้ ได้ดำเนินการวัดความตึงของเอ็นขึ้นบนหน้าไม้แร็กเกต ก่อนทดสอบซ้ำทุกๆ 3 ครั้ง

รูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกต



สี่เหลี่ยม (RR: Yonex: VCORE 95D)

สามเหลี่ยม (RT: Prince: EX03 Tour100)

วงรี (RO: Babolat: Pure Strom GT)

**รูปที่ 9** แสดงรูปแบบโครงสร้างของหน้าไม้แร็กเกตในแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นตัวแทนในการวิจัย ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันไป อาทิเช่น รูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม (RR) ใช้ Yonex: VCORE 95D

2. จำลองการเสิร์ฟฟลูคแพลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาตำแหน่งจุดกระทบของลูกเทนนิสบนเอ็นหน้าไม้ 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูงที่ความเร็วรอบมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยความเร็วของไม้แร็กเกตในขณะเสิร์ฟฟลูคแรกของนักเทนนิสในการแข่งขันระดับนานาชาติ (Chow et al., 2003: Brody, Cross, 2002)

3. เลือกลูกเทนนิสที่กระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุดจุดกระทบละ 5 ลูก จากการทดสอบ จำนวน 8-12 ครั้ง แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องแบบ 3 มิติ จากกล้องความเร็วสูง (2,000 Hz) จำนวน 2 ตัว เพื่อศึกษาอัตราเร่ง ความเร็ว และการแสดงออกของลูกเทนนิสเมื่อถูกกระทบจากการเสิร์ฟลูกในแต่ละครั้ง

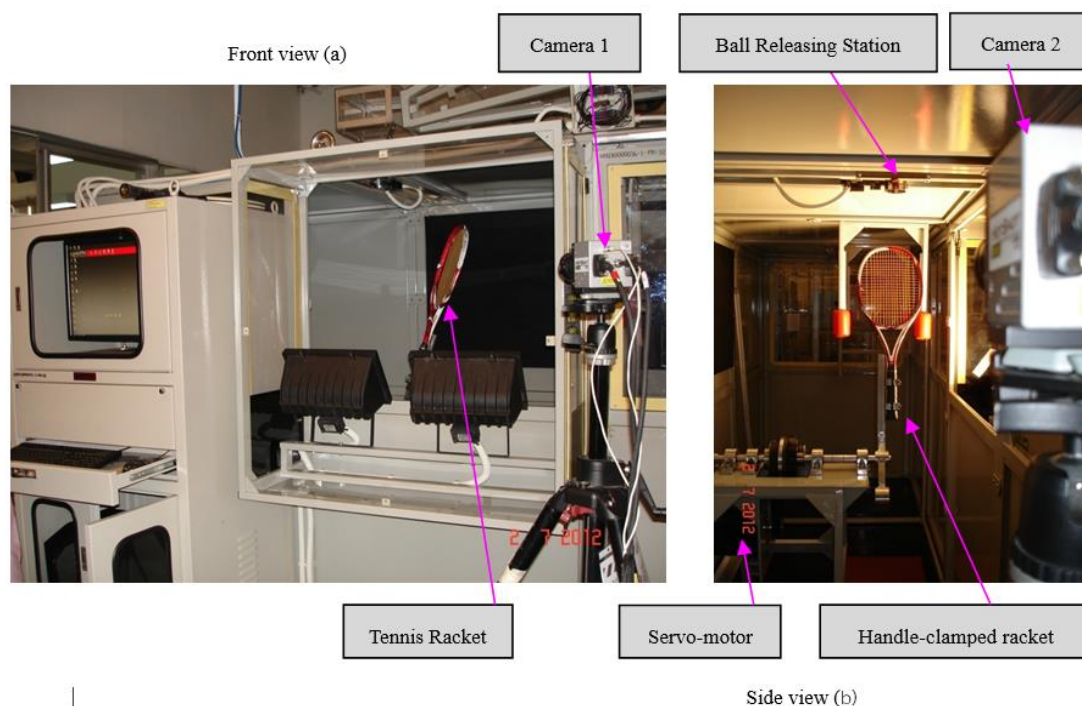
นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้กำหนดใช้ผลิตภัณฑ์ลูกเทนนิสที่นิยมใช้ในรายการแข่งขันระดับนานาชาติ ยี่ห้อ Wilson US Open โดยก่อนทดลองในการเสิร์ฟแต่ละขั้นตอน ลูกเทนนิสถูกทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติในการกระด้างของลูกเทนนิส (ball bouncing = 134-142 cm; ITF, 2009) และใช้ทดสอบในการเสิร์ฟไม่เกิน 45 ครั้ง ทั้งนี้เพื่อควบคุมปัจจัยต่างๆที่อาจจะส่งผลการวิจัยให้มากที่สุด

#### 4. ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลโดยมีขั้นตอนดังนี้

##### 4.1) การเตรียมก่อนการเก็บข้อมูล

4.1.1) นำไม้แร็กเกตขึ้นนำจากต่างประเทศที่เป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบ โครงสร้างหน้าไม้คือ สี่เหลี่ยม (RR) ในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตแรก และในขั้นตอนที่ 1.2 ในอีกสองรูปแบบโครงสร้าง คือ สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) มาขึ้นเอ็นชนิดเดียวกันยี่ห้อ Babolat-Pro Hurricane โดยกำหนดความตึงของเอ็นที่ขึ้นบนหน้าไม้แร็กเกตเริ่มต้นเท่ากัน 60 ปอนด์ ซึ่งใกล้เคียงกับที่กลุ่มนักกีฬาระดับชาติและนานาชาติส่วนใหญ่ ใช้ระหว่าง 50-60 ปอนด์

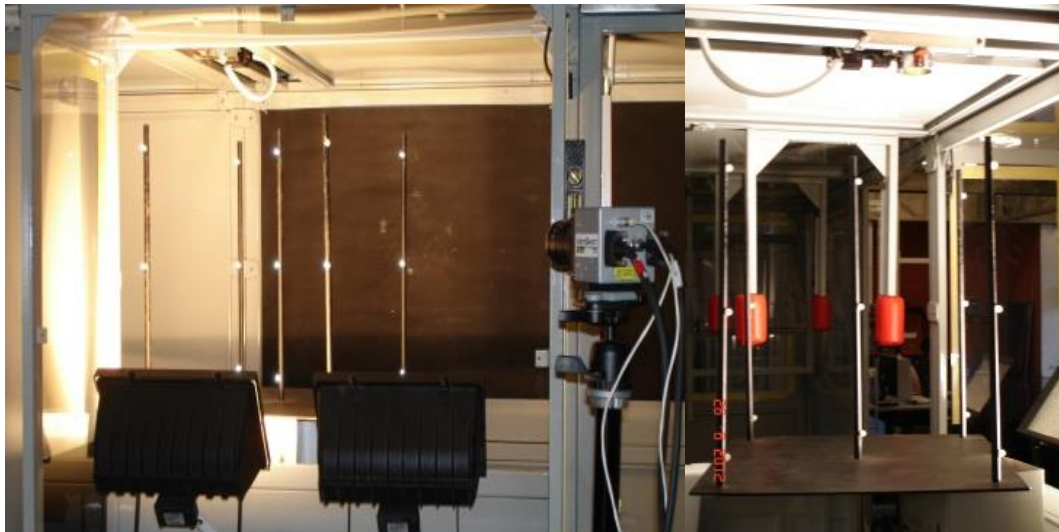
4.1.2) ปลอ่ยทิ้งไว้เพื่อให้ความตึงมีค่าคงที่ประมาณ 3 วัน ก่อนเริ่มทดสอบ รวมถึงติดตัวสะท้อนแสง (marker) ชนิดแถบเทปมีความกว้าง 0.5 ซม. ที่บริเวณไม้แร็กเกต จำนวน 4 ตำแหน่งคือ ที่ปลายบนหน้าไม้แร็กเกต (top), ปลายล่างหน้าไม้แร็กเกต (bottom), ด้านซ้าย (left) และด้านขวาไม้แร็กเกต (right) และเก็บข้อมูลตัวแปรคุณลักษณะพิเศษเฉพาะต่างๆของผลิตภัณฑ์ไม้เทนนิส ติดตั้งชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่อง แบบ 3 มิติ ด้วยกล้องความเร็วสูง 2,000 เฮิร์ตซ์ จำนวน 2 ตัว เข้ากับเครื่องทดสอบลูกและไม้เทนนิส (Tennis ball and racket tester) ดังรูปที่ 10 โดยกล้องความเร็วสูงตัวที่ 1 อยู่ด้านหน้าเครื่องทดสอบ (Front View; a) ทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวตั้งฉากกับเครื่องทดสอบ และกล้องความเร็วสูงตัวที่ 2 อยู่ด้านข้างซ้ายของเครื่องทดสอบ มีแนวทิศของกล้องเกือบตั้งฉากกับเครื่องทดสอบ ทำมุมเอียงออกไปทางขวาประมาณ 5 องศา (Side view; b)



**รูปที่ 10** เครื่องจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบเทนนิสภายในห้องปฏิบัติการ (Flat serve via strike simulating machine) ประกอบด้วยมอเตอร์ (5 HP servo-motor) และชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ พร้อมกล้องความเร็วสูง จำนวน 2 ตัว เก็บข้อมูลทดลองจากการติดตั้งไม้แรกเกิดกับแท่นแขนเหวี่ยง โดย (a) กล้องความเร็วสูงตัวที่ 1 จับภาพด้านหน้า (front view with camera-1) และ (b) กล้องความเร็วสูงตัวที่ 2 ด้านข้าง (Side view with camera-2)

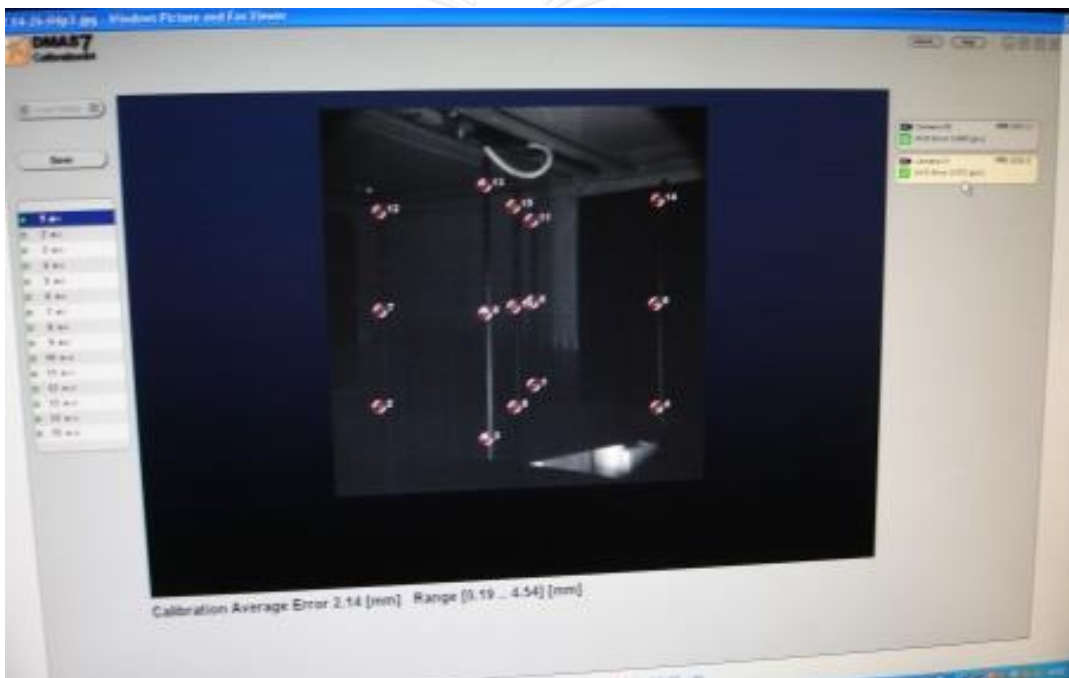
#### 4.2) การทดสอบ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

4.2.1) การปรับเทียบตำแหน่งมาตรฐาน (Calibration) ก่อนเก็บข้อมูล โดยติดตัวสะท้อนแสง (marker) ชนิดครึ่งวงกลมขนาด 0.5 ซม. รวม 15 จุด ดังรูปที่ 11 ใช้จำนวน แกนปรับเทียบตำแหน่งมาตรฐานแนวตั้ง 5 แกน ระยะห่างระหว่างแกน 0.5 เมตร โดยแกนที่ห้าอยู่ตรงกลาง (Side view; b) และติดตัวสะท้อนแสงแนวละ 3 ตำแหน่ง ระยะห่างในแนวตั้ง 0.25 เมตร (Calibration frame of 0.5 x 0.5 x 0.5 m with 15 markers) และกรองข้อมูลดิบ ด้วยวิธี ButterWorth ตัดออกประมาณ 17 % (sampling frequency = 2,000 and cutoff = 350) พบว่าการปรับเทียบตำแหน่งมาตรฐาน มีค่าความคาดเคลื่อน (estimated error) เพียง 2.14 มม. หรือ 0.043 % แสดงผลการวิเคราะห์ตามหน้าจอคอมพิวเตอร์ (computer screen display; c)



Front view (a)

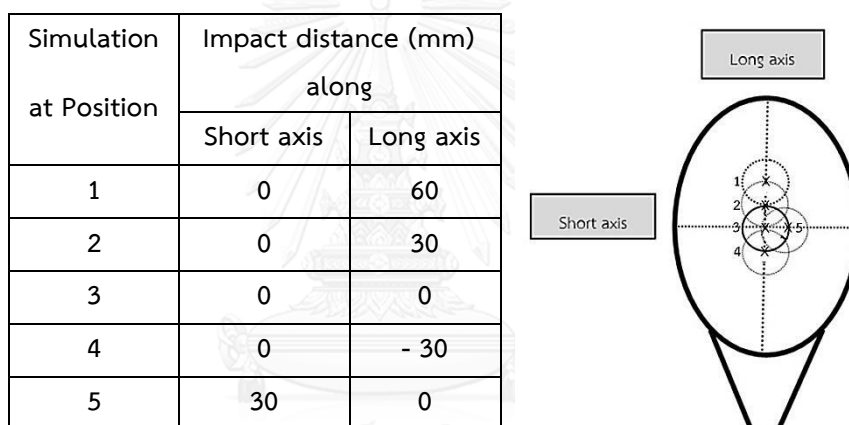
Side view (b)



Computer screen display (c)

รูปที่ 11 การปรับเทียบตำแหน่งมาตรฐาน (Calibration) ก่อนเก็บข้อมูล โดยติดตั้งสะท้อนแสง (marker) ระยะห่างระหว่างแกน 0.5 เมตร รวม 15 จุด (Calibration frame of 0.5 x 0.5 x 0.5 m with 15 markers) โดย (a) จากกล้องความเร็วสูงตัวที่ 1 จับภาพด้านหน้า (front view), (b) กล้องความเร็วสูงตัวที่ 2 ด้านข้าง (Side view) และ (c) จอแสดงภาพ (computer screen display).

4.2.2) นำไม้แร็กเกตมาติดตั้งและยึดไว้กับแท่นแขนเหวี่ยงของเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ (handle-clamped racket with counter balance) ดังรูปที่ 10 (Side view; b) ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงจริง (real strike) ได้จากมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า (5 HP servo-motor) รวมถึงการปรับเพื่อหาตำแหน่งจุดกระทบของลูกเทนนิสบนเอ็นหน้าไม้ 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน จากชุดอุปกรณ์ความคมการปล่อยลูกเทนนิส [รูปที่ 10; Side view (b), ball releasing station] ได้แก่ ตำแหน่ง 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้แร็กเกต 60 มม. (P1: at one tennis ball distance above GSC by Short axis= 0, Long axis =60; 0, 60), ตำแหน่ง 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้แร็กเกต 30 มม. (P2: at an half a ball distance above GSC; 0, 30), ตำแหน่ง 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (P3: at Geometric String-bed Center-GSC; 0, 0), ตำแหน่ง 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, -30) และตำแหน่ง 5 เอียงจากจุดกลางหน้าไม้ไปทางขวา 30 มม. (30, 0) ดังรูปที่ 12



**รูปที่ 12** แสดงตำแหน่งจุดกระทบที่แตกต่างกันทั้ง 5 คือ ตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้แร็กเกต 60 มม. (Short axis= 0, Long axis =60), ตำแหน่งที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30), ตำแหน่งที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (0, 0: Geometric String-bed Center-GSC), ตำแหน่งที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม.(0, -30) และตำแหน่ง 5 เอียงออกไปทางขวา 30 มม. (30, 0) ตามรูปภาพ

4.2.3) ในขั้นตอนที่ 1.1 ทำการทดสอบแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ จำนวน 8-12 ครั้ง โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูงที่ความเร็วรอบมอเตอร์เท่ากับ 450 rpm ( $\omega = 47.14 \text{ rad.s}^{-1}$ ) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยความเร็วของไม้แร็กเกตในขณะเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสในการแข่งขันระดับนานาชาติ โดยไม้แร็กเกตมีค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุมคงที่ ( $\omega = 49.99 \pm 0.04 \text{ rad.s}^{-1}$ ) ซึ่งไม้แร็กเกตอิสระจากแรงขับของมอเตอร์ก่อนที่เข้ากระทบลูกเทนนิส ทั้งนี้ ใช้การกำหนดจุดกระทบแบบสุ่ม (Random assignment) ด้วยการจับสลาก มี 3 แบบ สำหรับ

รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตแรก (RR) คือใช้ตำแหน่งที่ 3 (GSC), 2, 1, 4 และ 5, สำหรับรูปแบบโครงสร้างไม้ที่สอง (RT) คือตำแหน่ง 1, 2, 3, 4 และ 5 และโครงสร้างไม้ที่สาม (RO) คือตำแหน่ง 2, 3, 1, 5 และ 4 เรียงตามลำดับ

4.2.4) เลือกผลการทดสอบที่ลูกเทนนิสกระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุดจุดละ 5 ผลการทดสอบ (จากการทดสอบ 8-12 ครั้ง) แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องแบบ 3 มิติ จากกล้องความเร็วสูงทั้งสองตัว ซึ่งในการวิเคราะห์ภาพเพื่อความเที่ยงตรงถูกต้องขณะลูกเทนนิสเข้ากระทบ (precise and accurate tracking of ball and racket collision) นั้น ซอฟต์แวร์สามารถขยายภาพให้ใหญ่และชัดขึ้น พร้อมแนะนำจุดตรงกลางวงกลมสีแดงที่ต้องการเลือกแบบอัตโนมัติ โดยใช้หลักการแบบจุดศูนย์กลางของมวลลูกเทนนิส (center of mass) เพื่อหาอัตราเร่ง ความเร็ว และการแสดงออกเมื่อลูกเทนนิสถูกกระทบ (ball behavior) จากการเสิร์ฟลูกในแต่ละผลการทดสอบ ทั้งนี้ความเร็วหน้าไม้ ณ จุดกระทบลูกเทนนิสในแต่ละตำแหน่งคำนวณได้จากสมการ :  $V = \omega r$  โดย  $V$  คือความเร็วหน้าไม้,  $\omega$  คือความเร็วเชิงมุมของไม้ และ  $r$  คือรัศมีระยะทางจากจุดหมุนถึงจุดกระทบกลางหน้าไม้ หรือสามารถคำนวณจากความเร็วหน้าไม้จากค่าเฉลี่ยความเร็วตำแหน่งปลายบนหน้าไม้แร็กเกต (top) และปลายล่างหน้าไม้แร็กเกต (bottom) รวมกันแล้วหารด้วยสอง (Chow et al., 2003; Allen, Haake, Goodwill, 2011)

#### การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ทำการเก็บข้อมูลบันทึกการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยกล้องความเร็วสูง 2,000 เฮิร์ตซ์ จำนวน 2 ตัว จากรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตแรก (RR) ที่จุดกระทบลูกเทนนิส 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ ณ ศูนย์ทดสอบ วิจัย วัสดุและอุปกรณ์ทางการกีฬา คณะวิทยาศาสตร์ การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนดังกล่าว เป็นขั้นตอนที่ 1.1

2. คัดเลือกลูกเทนนิสที่กระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุดจุดละ 5 ผลการทดสอบ จากการทดสอบ 8-12 ครั้ง จากรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตแรก (RR) แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่อง เพื่อหาอัตราเร่ง ความเร็ว และการแสดงออกเมื่อลูกเทนนิสถูกกระทบจากการเสิร์ฟลูกในแต่ละครั้ง

3. หลังจากวิเคราะห์ สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะความคิดเห็นที่ได้จากการศึกษาวิจัย ทดลองในขั้นตอนย่อยที่ 1.1 จึงดำเนินการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์การเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อเนื่องจากรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตที่สอง (RT) และไม้แร็กเกตที่สาม (RO) เรียงตามลำดับ ทั้งนี้ ได้ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตแรก โดยผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนดังกล่าว เป็นขั้นตอนที่ 1.2

### เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องทดสอบลูกและไม้เทนนิส (Tennis Ball and Racket Tester with High speed camera 1,800 Hz ; SIMI, Germany)
2. เครื่องชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ (3D Motion System, DMAS, USA) พร้อมกล้องความถี่ 2,000 เฮิรตซ์ จำนวน 2 ตัว (High speed camera 2,000 Hz and calibration frame)
3. เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและการกระเด็นลูกเทนนิสพร้อมชุดวิเคราะห์ข้อมูล (ball bouncing; SIMI, Germany) รวมถึงขนาด และน้ำหนักของลูกเทนนิส เป็นไปตามข้อกำหนดสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (ITF, 2009)
4. เครื่องมือวัดความตึงของเส้นเอ็นบนหน้าไม้แร็กเก็ต (String tension measurement, Gosen TM-880, Japan)

### การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป (SPSS/PC Window Version 11.5) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของความเร็วลูกเทนนิสที่ต่างกันในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส รวมทั้งเปรียบเทียบระหว่าง 3 รูปแบบโครงสร้าง หาค่าสถิติ ดังนี้

1. วิเคราะห์ผลของการทดสอบทุกรายการระหว่างกลุ่มโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way Analysis of Variance) สำหรับรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเก็ตแรก ในขั้นตอนที่ 1.1
2. วิเคราะห์ผลของการทดสอบทุกรายการระหว่างกลุ่มโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way Analysis of Variance) เพื่อเปรียบเทียบ 3 รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเก็ต ในขั้นตอนที่ 1.2
3. หากพบความแตกต่างจึงทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบรายคู่ ด้วยวิธีแบบแอลเอสดี (LSD) ที่ระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาโมเดลสมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ค่าตัวแปรอิสระมาตรฐานบางส่วนจากการทดลอง ด้วยเครื่องทดสอบมาประกอบพร้อม

### กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นนักกีฬาเทนนิสชาย ซึ่งได้จากการเลือกตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จำนวน 6 คน เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างมีจำนวนจำกัด และมีตัวแปรอิสระ 5 ตัวแปร (ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนเข้ากระทบลูกเทนนิส, ความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต, น้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต, ค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต และค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ) ดำเนินการเก็บข้อมูลอย่างน้อย 150 ข้อมูล ถึง 300 ข้อมูล โดยกำหนดความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อำนาจการทดสอบทางสถิติเท่ากับ .80 และขนาดของผลที่หวังจะเกิดขึ้น .60 ผลจากการเปิดตารางโคเฮน; Cohen, 1988) จะได้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 12 คน ซึ่งในการศึกษาของชอพพิน (Choppin, 2008) โมเดลรูปแบบการกระทบบนหน้าไม้ในการตีลูกโฟร์แฮนด์แบบ 3 มิติ เพื่อทำนายการเคลื่อนที่และคำนวณหาความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 13 คน

### เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเข้าร่วมการวิจัย

1. เคยเป็นนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติอายุ 15-18 ปี หรืออยู่ในระดับที่สูงกว่าสังกัดลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทย
2. มีประสบการณ์เข้าร่วมแข่งขันระดับนานาชาติมากกว่า 3 ครั้ง ขึ้นไป
3. มีส่วนสูงอยู่ในช่วง 175-190 เซนติเมตร สามารถเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ได้ดี และรุนแรง และมีการประเมินนักกีฬาจากผู้ฝึกสอนทีมชาติ
4. ไม่มีประวัติการบาดเจ็บที่รุนแรง ภายในระยะเวลา 3 เดือนที่ผ่านมา
5. สนใจในการเข้าร่วมวิจัย มีการแข่งขันและมอบรางวัลให้เพื่อเป็นแรงจูงใจ



### เกณฑ์การคัดเลือกออกจากการวิจัย

1. เกิดเหตุสุดวิสัยที่ทำให้ไม่สามารถเข้าร่วมการวิจัยต่อได้ เช่น มีอาการบาดเจ็บรุนแรงที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพในการเสิร์ฟ หรือมีอาการเจ็บป่วย เป็นต้น
2. ไม่สามารถปฏิบัติตามเงื่อนไขของการวิจัยได้ อาทิเช่นไม่ได้เข้าร่วมการทดสอบครบทั้งหมด จำนวน 2 ครั้ง (เสิร์ฟลูกแรกให้รุนแรงมากที่สุด ครั้งละ 60 ลูก X 2 ครั้ง)
3. ไม่สมัครใจในการเข้าร่วมการทดลองต่อ

### วิธีดำเนินการและขั้นตอนในการวิจัย

1. คัดเลือกตัวอย่างนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติแบบเจาะจง จากผู้ที่ใช้ไม้เทนนิสชั้นนำจากต่างประเทศ 1 ใน 3 รูปแบบโครงสร้าง/ผลิตภัณฑ์ จำนวน 6 คน เคยเข้าร่วมรายการแข่งขันระดับนานาชาติ และ/หรือการแข่งขันระดับชาติในรายการแข่งขันกีฬาเทนนิสอาชีพ
2. ทำการแบ่งกลุ่มนักกีฬา โดยใช้การกำหนดกลุ่มตามรูปแบบโครงสร้าง หรือผลิตภัณฑ์ที่ตนเองเคยใช้มาก่อน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มๆละ 2 คน
3. ดำเนินการเก็บข้อมูลและบันทึกภาพวิดีโอนักกีฬาในขณะที่เสิร์ฟลูกทุกครั้งทีลูกเทนนิสลงในพื้นสนามเทนนิสที่กำหนดไว้ ณ สนามกีฬาเทนนิส คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งนักกีฬาแต่ละบุคคลเสิร์ฟลูกแรก รวม 2 ไม้แรกเกิดคือ ด้วยไม้แรกเกิดของตนเองที่คุ้นเคยใช้ในการแข่งขัน และไม้แรกเกิดอันเดิมที่ใช้ในการศึกษาในขั้นตอนที่ 1 บันทึกกล้องวิดีโอความเร็วสูงของเครื่องวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ หลังจากการปรับเทียบค่าตำแหน่งมาตรฐาน และวัดค่าความตึงของเอ็นบนหน้าไม้แรกเกิดก่อนการทดสอบในแต่ละชุดทดสอบ ดังรูปที่ 13 รวมถึงการสอบถามเพื่อเก็บข้อมูลความรู้สึกนักกีฬา หลังจากเสิร์ฟลูกแล้ว
4. นำข้อมูลมาการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ (เครื่องมือชุดเดียวกับการทดลองขั้นตอนที่ 1 ในห้องปฏิบัติการ) จากบันทึกภาพวิดีโอนักกีฬาในขณะที่เสิร์ฟลูกแล้ว มาคัดเลือกข้อมูลในการเสิร์ฟลูกของนักกีฬาแต่ละบุคคล
5. ใช้ข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระที่สำคัญทุกตัว มาสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลชจากนักกีฬาเยาวชนทีมชาติ และใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระบางส่วนที่ได้มาตรฐานจากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นตอนที่ 1 มาประกอบรวม

## 6. ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลโดยมีขั้นตอนดังนี้

### 6.1) ก่อนการเก็บข้อมูล

6.1.1) ผู้วิจัยชี้แจงและทำหนังสืออธิบาย วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย รวมถึงขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมทั้งขอความร่วมมือในการวิจัยต่อกลุ่มตัวอย่าง ผู้ปกครองของนักกีฬา และผู้มีส่วนร่วมในการวิจัย เมื่อกลุ่มตัวอย่างยินยอมเข้าร่วมวิจัย ผู้วิจัยให้กลุ่มตัวอย่างลงนามในหนังสือยินยอมเข้าร่วมวิจัย (ภาคผนวก ค)

6.1.2) นำเสนอรูปแบบการทดสอบความสามารถในการเสิร์ฟลูกแรกตลอดโครงการวิจัย ซึ่งเลียนแบบตามรายการแข่งขันระดับนานาชาติเฉพาะการเสิร์ฟลูกแรกเท่านั้น และมีการทดสอบความสามารถเสิร์ฟลูกแรกได้ดีและรุนแรงก่อนการทดลอง เป็นการเตรียมพร้อมตัวนักกีฬา และช่วยลดความเสี่ยงที่อาจจะเกิดการบาดเจ็บขึ้น

6.1.3) ทำการแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม โดยใช้การกำหนดกลุ่มตามรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ที่ตนเองเคยใช้มาก่อน กลุ่มละ 2 คน ดังนี้

กลุ่มทดลองที่ 1 เสิร์ฟลูกด้วยไม้แร็กเกตโครงสร้างแรก (RR)

กลุ่มทดลองที่ 2 เสิร์ฟลูกด้วยไม้แร็กเกตโครงสร้างที่สอง (RT)

กลุ่มทดลองที่ 3 เสิร์ฟลูกด้วยไม้แร็กเกตโครงสร้างที่สาม (RO)

6.1.4) นำไม้แร็กเกตของตนเองที่คุ้นเคย (เป็นผลิตภัณฑ์ยี่ห้อเดียวกัน ซึ่งอาจจะเป็นรุ่นเดียวกัน หรือรุ่นที่แตกต่างเทียบเคียงกันได้) เป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้คือ สีเหลี่ยม (RR), สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) นำมาขึ้นเอ็นชนิดเดียวกันยี่ห้อ Babolat-Pro Hurricane โดยมีความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตตามที่ตนเองเคยใช้ในการแข่งขัน และใช้ปากกาสีชนิดพิเศษแต้ม (land marker) บริเวณเอ็นบนหน้าไม้ในตำแหน่งจุดกระทบที่ 2 รูปที่ (c) ซึ่งด้านหลังหน้าไม้แร็กเกตจึงไม่มีผลต่อความเร็วของลูกเทนนิส รวมถึงติดตัวสะท้อนแสงชนิดแถบเทปมีความกว้าง 0.5 ซม. ที่บริเวณไม้แร็กเกต จำนวน 4 ตำแหน่ง เช่นเดียวกับการทดลองขั้นตอนที่ 1 ในห้องปฏิบัติการ

ทั้งนี้ ไม้แร็กเกตอันที่สองเป็นไม้แร็กเกตอันเดิมที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1 ในห้องปฏิบัติการ แต่นำมาขึ้นเอ็นใหม่ยี่ห้อ Babolat-Pro Hurricane อีกครั้งหนึ่ง โดยกำหนดความตึงของเอ็นที่ขึ้นบนหน้าไม้แร็กเกตเริ่มต้น ระหว่าง 50-60 ปอนด์ ตามที่ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตแนะนำ หรือตามที่นักกีฬากลุ่มใหญ่ต้องการใช้ ทั้งนี้เพื่อจะได้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนมีความหลากหลายต่างกันอย่างมากขึ้น และดำเนินการเก็บข้อมูลเหมือนกับไม้แร็กเกตอันแรก

## 6.2) การทดสอบ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

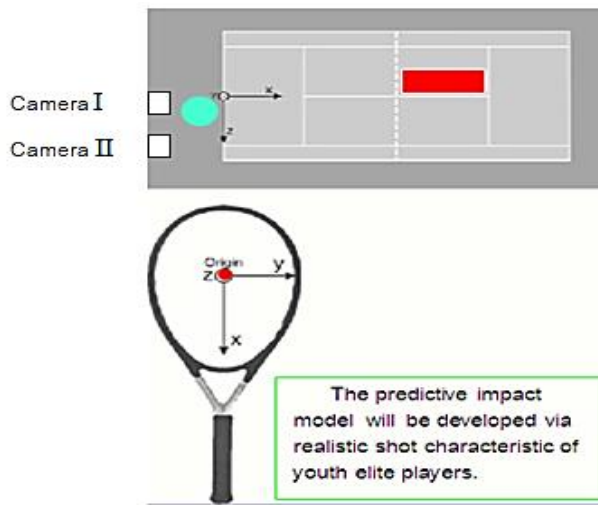
6.2.1) บันทึกข้อมูลประวัติส่วนตัว ชั่งน้ำหนักตัว วัดส่วนสูง และบันทึกตัวแปรคุณลักษณะพิเศษเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตที่ใช้ทดลองสำหรับนักกีฬาแต่ละบุคคล ไม้แร็กเกตรวม 2 อันคือ ไม้แร็กเกตของนักกีฬา และไม้แร็กเกตอันเดิมที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1 ทั้งนี้ นักกีฬาต้องมีการอบอุ่นร่างกายก่อนการทดลองคล้ายในขณะแข่งขันจริงอย่างน้อย 30 นาที เพื่อช่วยลดความเสี่ยงที่อาจจะเกิดการบาดเจ็บในขณะทดสอบ

6.2.2) ให้นักกีฬาแต่ละคนเสิร์ฟแบบเสิร์ฟฟลูกรวดด้วยไม้แร็กเกตอันแรก ซึ่งเป็นไม้แร็กเกตของตนเองและขึ้นเอ็นใหม่ ชุดละ 5 ครั้ง จำนวน 12 ชุด มีการพักระหว่างลูกและระหว่างชุดคล้ายการแข่งขันจริงมากที่สุด รวม 60 ลูกต่อรายการแข่งขัน (จาก 1 match = 3-6 games: 5 serve/game, 3-5 sets/match) โดยวัดความตึงของเอ็นที่ขึ้นบนหน้าไม้แร็กเกตก่อนการทดสอบ และมีการวัดซ้ำหลังทดสอบทุกๆ 3 ชุด

6.2.3) เก็บข้อมูลและบันทึกภาพวิดีโอให้นักกีฬาในขณะเสิร์ฟลูกทุกครั้งที่ถูกเทนนิสลงในพื้นสนามเทนนิสที่กำหนดไว้ โดยมีผู้ช่วยวิจัยที่อยู่คอร์ตตรงข้ามกับนักกีฬาเสิร์ฟ (บันทึกลูกที่ดี ประมาณ 25-30 ลูก จากการเสิร์ฟลูก 60 ครั้ง ความสำเร็จเฉลี่ยร้อยละ 40-55) จากกล้องวิดีโอความเร็วสูง 2 ตัว อยู่ด้านหลังนักกีฬา ดังรูปที่ 13 (a) ตำแหน่งกล้องความเร็วสูง ตำแหน่งนักกีฬาเสิร์ฟ และพื้นที่เป้าหมายในสนามเทนนิส หลังจากมีการติดตั้งเครื่องมือชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ มีการปรับเทียบมาตรฐานก่อนการทดสอบ โดยผู้ฝึกสอนชี้แจงให้นักกีฬาก่อนทำการเสิร์ฟลูกเทนนิสแบบเสิร์ฟฟลูกรวดให้แรงและเร็วที่สุด ดังรูปที่ 13 (b) พร้อมแบบสอบถามความรู้สึกนักกีฬามีแรงสั่นสะท้านที่ข้อมือนักกีฬามากน้อยเพียงใด

6.2.4) หลังจากนั้น ดำเนินการบันทึกข้อมูลภาพวิดีโอของนักกีฬาในขณะเสิร์ฟลูกทุกครั้งที่ถูกเทนนิสลงในพื้นที่ที่กำหนดไว้ในสนามเทนนิส จากกล้องวิดีโอความเร็วสูงของเครื่องวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ เช่นเดิม โดยใช้อุปกรณ์ไม้แร็กเกตอันที่สองอันเดิมที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1 ในห้องปฏิบัติการ ชุดละ 5 ครั้ง จำนวน 12 ชุด มีการพักระหว่างลูกและระหว่างชุดคล้ายการแข่งขันจริงมากที่สุดอีก 60 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 120 ผลการทดสอบต่อคน

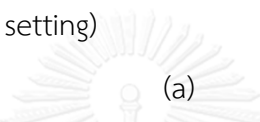
6.2.5) นำข้อมูลการบันทึกภาพวิดีโอให้นักกีฬาในขณะเสิร์ฟลูกที่ใช้อุปกรณ์ไม้แร็กเกตทั้งสองครั้ง รวมทั้งสิ้น 120 ผลการทดสอบต่อบุคคล มาคัดเลือกข้อมูลในการเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งจุดกระทบที่ต้องการ (5 impact positions) ของนักกีฬาแต่ละบุคคล ตำแหน่งจุดกระทบละ 5 ผลการทดสอบการเสิร์ฟ รวม 25 ผลการทดสอบต่อไม้แร็กเกต (จุดกระทบละประมาณ 5 ผลการทดสอบ X 5 ตำแหน่ง) ทั้งนี้ นักกีฬาแต่ละคนจะมีข้อมูลรวม 50 ผลการทดสอบ (ผลการทดสอบ 25 ต่อไม้แร็กเกต X 2 ไม้แร็กเกต) ดังนั้นจะได้ข้อมูลผลการทดสอบจากนักกีฬารวมทั้งสิ้น 300 ผลการทดสอบการเสิร์ฟ (ผลการทดสอบ 50 ต่อคน X นักกีฬารวม 6 คน)



(camera setting)



(flat first serve pattern)



First serve guideline by tennis coaching

(b)



(calibration)



(tracking data)



(string tension)



(markers on impact P-2 and racket frame)

(c)

**รูปที่ 13** การติดตั้งชุดเครื่องมือวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ ณ สนามกีฬาเทนนิส คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (a) ภาพแสดงตำแหน่งกล้องความเร็วสูง ตำแหน่งนักกีฬาเสิร์ฟ ตำแหน่งกล้องความเร็วสูง 2 ตัวอยู่ในแนวด้านหลังนักกีฬา และพื้นที่เป้าหมายในสนามเทนนิส (T= color) ที่กำหนดไว้ (b) ผู้ฝึกสอนชี้แจงให้นักกีฬาทำการเสิร์ฟลูกเทนนิสแบบเสิร์ฟลูกแรกให้แรงและเร็วที่สุด และ (c) ภาพแสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานก่อนการทดสอบ (บนซ้าย), การวิเคราะห์ภาพในขณะที่เสิร์ฟ (บนขวา), การวัดความตึงของเอ็นบนหน้าไม้แรกเกิดก่อนการทดสอบ (ล่างซ้าย) และปากกาสีชนิดพิเศษแต้มบริเวณเอ็นบนหน้าไม้ และติดตัวสะท้อนแสงชนิดแถบเทปที่บริเวณไม้แรกเกิด (ล่างขวา)

6.2.6) นำข้อมูลที่เป็นตัวแปรสำคัญทุกตัว (ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิจัยในบทที่ 1) จากข้อมูลผลการทดสอบจากนักกีฬา 300 ผลการทดสอบการเสิร์ฟ มาคัดเลือกข้อมูลในการเสิร์ฟที่ดีตรงตามตำแหน่งจุดกระทบที่ต้องการ (5 impact positions) ตำแหน่งจุดกระทบละ 5 ผลการทดสอบของนักกีฬาแต่ละบุคคลอีกครั้ง เพื่อได้ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบครบทั้งห้าตำแหน่ง (ถ้าผลการทดสอบตำแหน่งจุดกระทบใดไม่ครบตามจำนวน 5 ผลการทดสอบ เลือกผลการทดสอบให้ได้มากที่สุดเท่าที่มีข้อมูลในแต่ละไม้แรกเกิด ซึ่งเป็นไปตามความถนัดและความสามารถของนักกีฬาแต่ละบุคคลในการเสิร์ฟลูกแรก) มาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์จากนักกีฬาเยาวชนทีมชาติ และใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระบางส่วนที่ได้มาตรฐาน (ball and racket ratio at 5 impact positions) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นตอนที่ 1 มาประกอบรวม

### การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. เก็บข้อมูลและบันทึกภาพวิดีโอในนักกีฬาในขณะที่เสิร์ฟลูกทุกครั้งที่ถูกเทนนิสลงในพื้นที่ที่กำหนดไว้ในสนามเทนนิส จากกล้องวิดีโอความเร็วสูง 2,000 เฮิร์ตซ์ จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้วิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ ของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ รวม 6 คน ณ สนามฝึกซ้อมกีฬาเทนนิส คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 13

2. คัดเลือกข้อมูลลูกเสิร์ฟเฉพาะการเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ (5 impact positions) ของนักกีฬาแต่ละบุคคล ทั้งนี้ได้ลูกเสิร์ฟที่ดีและตรงตามตำแหน่งทั้งห้าจุดกระทบ ประมาณ 25 ลูกต่อไม้แรกเกิด โดยตำแหน่งจุดกระทบขึ้นอยู่กับสไตล์การเสิร์ฟ ดังนั้นการเก็บข้อมูลและบันทึกภาพวิดีโอในนักกีฬาแต่ละบุคคล สามารถเก็บบันทึกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งจนครบ 50 ข้อมูลผลการทดสอบต่อคน [25 ผลการทดสอบต่อไม้แรกเกิด (จากการเลือกบันทึกเฉพาะลูกที่ดีที่มีความสำเร็จเฉลี่ยร้อยละ 40–55) × 2 ไม้แรกเกิด] ดังนั้นในหนึ่งรูปแบบโครงสร้าง (กลุ่ม) สามารถเก็บบันทึกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่ง 100 ผลการทดสอบ (50 ข้อมูลต่อคน × นักกีฬา 2 คนต่อกลุ่ม) และใน 3 รูปแบบโครงสร้าง มีข้อมูลผลการทดสอบและบันทึกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีและตรงตามตำแหน่ง จำนวน 300 ข้อมูล (100 ผลการทดสอบต่อรูปแบบโครงสร้าง × 3 รูปแบบโครงสร้าง)

3. นำข้อมูลการบันทึกภาพวิดีโอในขณะที่เสิร์ฟลูกที่ได้คัดเลือกจากจำนวนทั้งหมด 300 ผลการทดสอบ (จากนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ รวม 6 คน) มาคัดเลือกข้อมูลการบันทึกภาพวิดีโอลูกดีและตรงตามตำแหน่งจุดกระทบๆไม่เกินห้าผลการทดสอบของนักเทนนิสแต่ละบุคคลอีกครั้ง (เป็นไปตามความถนัดและความสามารถของนักกีฬาแต่ละบุคคล) แล้วจึงนำภาพบันทึกวิดีโอมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ จากเสิร์ฟลูกแรกของนักกีฬาในแต่ละบุคคลต่อไป

### เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบสามมิติ (3D Motion System, DMAS, USA) พร้อมกล้องความถี่ 2,000 เฮิร์ตซ์ จำนวน 2 ตัว) High speed camera 2,000 Hz and calibration frame)

2. เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและการกระตังของลูกเทนนิส พร้อมชุดวิเคราะห์ข้อมูล (ball bouncing; SIMI, Germany) รวมถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และน้ำหนักของลูกเทนนิส เป็นไปตามข้อกำหนดสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (ITF, 2009)

3. เครื่องมือวัดความตึงของเส้นเอ็นบนหน้าไม้แรกเกิด (String tension measurement, Gosen TM-880, Japan)

### การวิเคราะห์ข้อมูล

ในขั้นตอนที่ 2 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป (SPSS/PC Window Version 11.5) ในการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อทดสอบหาสมการในการทำนายความเร็วลูกเสิร์ฟลูกแพร์ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส หาค่าสถิติ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อนแบบการคัดเลือกลำดับขั้น (Multiple Regression and Correlation Analysis; Stepwise) เพื่อทดสอบหาสมการถดถอยในการทำนายความเร็วของลูกเทนนิสจากการเสิร์ฟลูกแรก และทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (Adjusted R square) จากข้อมูลที่ได้ขั้นตอนที่ 2

2. หากพบความแตกต่าง จากทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระรวมที่ทำนายตัวแปรตาม ด้วยวิธีทดสอบค่าเอฟ (F-test) จึงดำเนินการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรต่อที่ระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วยุติในการเสิร์ฟลูกแฟลท์จากนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ และเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ศึกษาถึงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส อัตราเร่ง และความเร็วยุติของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไม้แรกเกิดขึ้นนำจากต่างประเทศ รวม 3 รูปแบบโครงสร้าง (สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงรี) และในขั้นตอนที่ 2 ศึกษาโมเดลเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วยุติในการเสิร์ฟลูกแฟลท์จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในขั้นตอนแรก มาร่วมประกอบในโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนาย (predictive impact model) เนื่องจากเป็นข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการเสิร์ฟของนักกีฬา โดยผู้วิจัยได้แบ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

#### ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 1

ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR ผลลัพธ์ที่ไม้แรกเกิดแรก เพื่อพิสูจน์หาตำแหน่งจุดกระทบที่มีความเร็วของลูกเทนนิสสูงสุด

- อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัยเพื่อที่ใช้ดำเนินการต่อเนื่อง

ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ใน 3 รูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (RR, RT และRO) เพื่อพิสูจน์ความแตกต่างใน 3 รูปแบบโครงสร้างไม้แรกเกิด เพื่อสร้างโมเดล

- อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัยเพื่อที่ใช้ดำเนินการต่อเนื่อง

#### ผลผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2

การสร้างโมเดลสมการถดถอย เพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิด ที่ทำให้เกิดความเร็วยุติของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก

- สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 2



## ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 1

### 1) ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR ผลลัพธ์ที่ไม่แรกเกิดแรกเพื่อพิสูจน์หาตำแหน่งจุดกระทบที่มีความเร็วของลูกเทนนิสสูงสุด

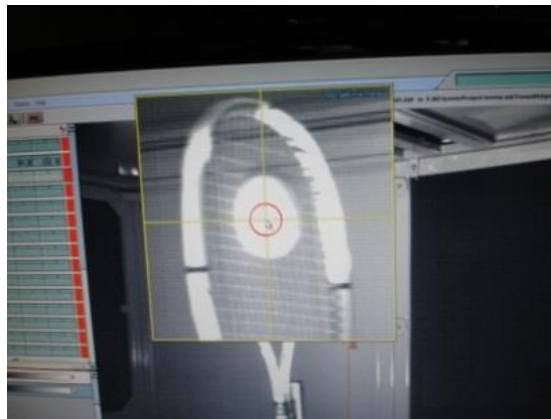
ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆจากการทดสอบในการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในแต่ละผลิตภัณฑ์ตามกระบวนการทดสอบ โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แรกเกิดที่ระดับสูง (ความเร็วรอบมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm) เพื่อให้มีความเร็วของหน้าไม้แรกเกิด ณ จุดกลางหน้าไม้ก่อนกระทบอยู่ระหว่าง  $30-35 \text{ ms}^{-1}$  ใกล้เคียงกับความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบในการแข่งขันระดับนานาชาติ (Chow et al., 2003) กำหนดตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสทั้ง 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน เลือกลูกเทนนิสที่กระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุดตำแหน่งละ 5 ลูก แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องแบบ 3 มิติ เพื่อหาค่าอัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกในแต่ละครั้ง มีรายละเอียดดังนี้

ค่าคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไม้แรกเกิดแรกอันใหม่และรุ่นเดียวกับที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาตินิยมใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขันระดับนานาชาติ พบว่า ผลิตภัณฑ์ไม้แรกเกิดโครงสร้างแรก คือ RR มีรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยมทำจากวัสดุ Graphite-Fullerene มีพื้นที่ขนาดหน้าไม้แรกเกิด 95 ตารางนิ้ว โดยขนาดหน้าไม้แรกเกิดมีความกว้าง 25.5 ซม. และความยาว 34.0 ซม. และมีตำแหน่งจุดกลางหน้าไม้แรกเกิด (0, 0: GSC) 17.0 ซม. จากปลายหัวไม้แรกเกิด ในภาคผนวก ข นำมาขึ้นเอ็นให้มีความตึงเริ่มต้นที่ 60 ปอนด์ หลังจากชั่วโมงแรก ค่าความตึงเอ็นลดลงเหลือ 56.8 ปอนด์ ทั้งนี้ ความตึงของเอ็นบนหน้าไม้มีการลดลงเรื่อยๆ แต่จะมีค่าค่อนข้างคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงน้อยในช่วงเวลาประมาณ 3 วันต่อมา มีค่าความตึงเหลือประมาณ 54.9 ปอนด์ จึงเริ่มการทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ หลังจากการปรับเทียบตำแหน่งมาตรฐาน (Calibration) ในการวิเคราะห์มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยเพียง 2.14 มม. หรือร้อยละ 0.043 ดังรูปที่ 11 ทั้งนี้ กำหนดให้ใช้ลูกเทนนิสยี่ห้อ Wilson US Open ในการทดลอง และทดสอบการกระเด็นของลูกมีค่าอยู่ระหว่าง 139-141 ซม. เป็นไปตามข้อกำหนดทางเทคนิคของสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ พบว่า ในขณะที่เสิร์ฟด้วยเครื่องทดสอบ ณ จุดกระทบของลูกเทนนิสบนเอ็นหน้าไม้ตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) ของไม้แรกเกิดรูปแบบโครงสร้าง RR ซึ่งแสดงวิธีในการวิเคราะห์ภาพที่มีความเที่ยงตรงและถูกต้องขณะลูกเทนนิสเข้ากระทบ (precise and accurate tracking of ball and racket collision) ดังรูปที่ 14 ซอฟต์แวร์สามารถขยายภาพให้ใหญ่และชัดขึ้น พร้อมแนะนำจุดตรงกลางวงกลมสีแดงที่ต้องการเลือกแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถวิเคราะห์และแสดงภาพการเข้ากระทบของลูกเทนนิสแบบต่อเนื่องได้ถึง 8 รูปภาพ (frame) ใช้เวลาเพียง 4 มิลลิวินาที (millisecond) โดยภาพก่อนที่ลูกเคลื่อนเข้ากระทบเอ็น (instance before

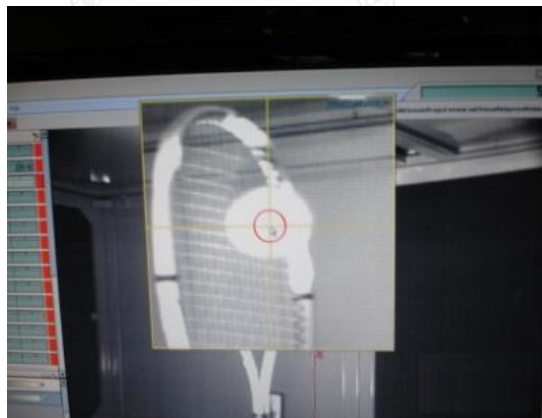
racket colliding; ball inbound) มีรูปร่างกลม ดังรูปที่ 14 (a) ภาพขณะที่ลูกเทนนิสเข้ากระทบ เต็มลูกในภาพที่ 14 (b) (at the 4<sup>th</sup> frame of ball inbound) มีรูปร่างวงรีแนวตั้งคล้ายรูปไข่ปลาย เล็กยกขึ้นบน เนื่องจากขณะเข้ากระทบมวลของลูกเทนนิสส่วนใหญ่เคลื่อนเข้าหาจุดกลางหน้าไม้ และภาพการเริ่มเคลื่อนที่ของลูกออกจากเอ็นบนหน้าไม้หลังกระทบ ในภาพที่ 14 (c) (instance outbound of ball leaving the racket) รูปร่างวงรีแนวนอน โดยมวลของลูกเทนนิสส่วนใหญ่ ของไม้พุ่งออกจากหน้าไม้แรกเกิด ซึ่งเป็นภาพสุดท้ายคือ ภาพที่ 8 (outbound of ball) พบว่า ลูกเทนนิสขณะกระทบบนเอ็นหน้าไม้จะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามการถ่ายเทของพลังงานที่ให้กับเอ็น บนหน้าไม้ของแต่ละตำแหน่งกระทบ รวมถึงการสปริงตัวและส่งพลังงานกลับให้กับลูกเทนนิส โดยมี รายละเอียดกราฟที่แสดง ค่าอัตราเร่งและความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ ตำแหน่งจุดกระทบ 1 ของ โครงสร้างไม้แรกเกิด RR หลังจากลูกกระทบและพุ่ง ออกจากเอ็นบนหน้าไม้แรกเกิด (instance outbound of ball) ตามรูปที่ 15 (a) (ภาพบนด้านขวาจากกล้องตัวที่ 1 และภาพซ้ายจากกล้องตัวที่ 2 อยู่ด้านหลังของไม้แรกเกิด และตั้งมุมกล้องเอียงออกไปทางขวาประมาณ 5 องศา ดังรูปที่ 10 (ในบทที่ 3) โดยลูกเทนนิสเคลื่อนที่ออกจากเอ็นหน้าไม้ด้วยอัตราเร่งที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก แล้วมีค่าลดลงของ อัตราเร่งลูกเทนนิสอย่างรวดเร็วเช่นกันตามด้วยการเพิ่มขึ้นของความเร็วลูกเทนนิสอย่างรวดเร็วอีกครั้ง โดยขณะที่ลูกเทนนิสมีค่าความเร็วสูงสุด (maximum velocity of ball outbound) เท่ากับ 43.48 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) ดังรูปกราฟที่ 15 (a) (กราฟด้านขวา) ในขณะที่ลูกเทนนิสมีค่าอัตราเร่ง (acceleration) เริ่มลดลงช่วงแรกมีค่าเท่ากับ  $186.6 \times 10^2$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ( $\text{ms}^{-2}$ ) ดังรูปกราฟที่ 15 (a) (กราฟด้านซ้าย) โดยใช้เวลาหลังจากปล่อยลูกเทนนิส 0.0295 วินาที (ใช้เวลา 0.0005 วินาทีต่อภาพ) รายละเอียดข้อมูลในภาคผนวก ก ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์การเข้ากระทบของลูกเทนนิสแบบต่อเนื่อง ณ จุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิดอีก 4 ตำแหน่งที่เหลือ คือ ตำแหน่ง 2, 3, 4 และ 5 มีลักษณะ รูปกราฟคล้ายกันกับจุดกระทบ 1 แตกต่างกันเฉพาะเพียงค่าอัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่ มากขึ้นหรือน้อยลง หลังจากลูกเทนนิสเข้ากระทบเท่านั้น ดังรูปที่ 16 ภาพที่ P2 (ตำแหน่งจุดกระทบที่ 2), P3, P4 และ P5 โดยค่าอัตราเร่งขณะลูกมีความเร็วสูงสุด ณ ตำแหน่ง 2, 3, 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ  $216.7 \times 10^2$ ,  $171.6 \times 10^2$ ,  $195.8 \times 10^2$  และ  $208.0 \times 10^2$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> เรียงตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วของลูกเทนนิสสูงสุดมีค่า เท่ากับ 44.50, 43.84, 43.57 และ 43.58 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ เช่นกัน ทั้งนี้กราฟความเร็วลูกเทนนิสตำแหน่งจุดกระทบกลางหน้าไม้แรกเกิด (GSC: ตำแหน่งจุดกระทบที่ 3) มีแนวโน้มที่รักษาระดับความเร็วของลูกเทนนิสค่อนข้างคงที่กว่าจุดกระทบอื่นๆ



(a)

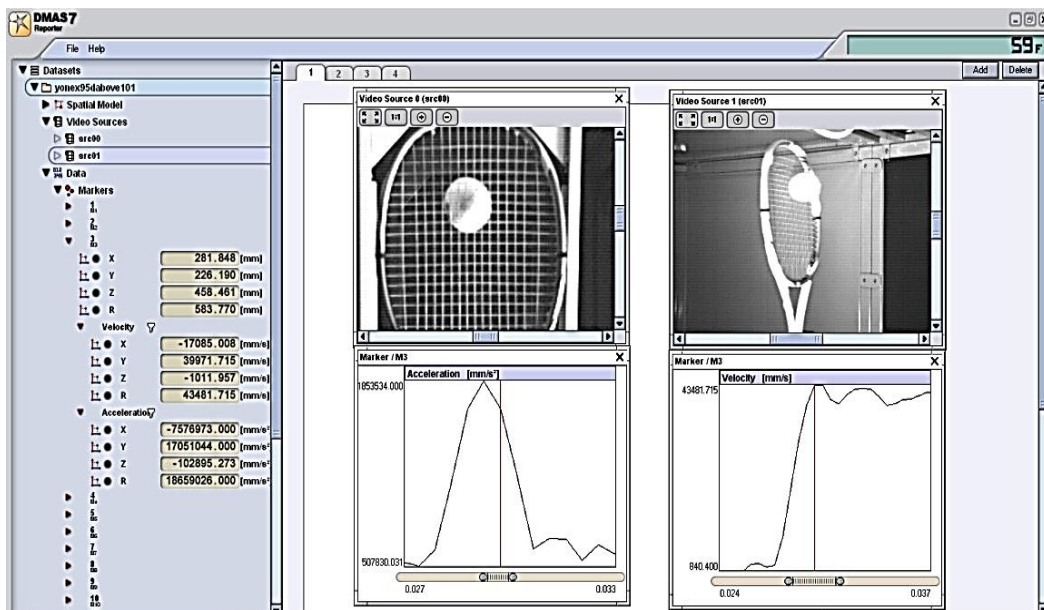


(b)

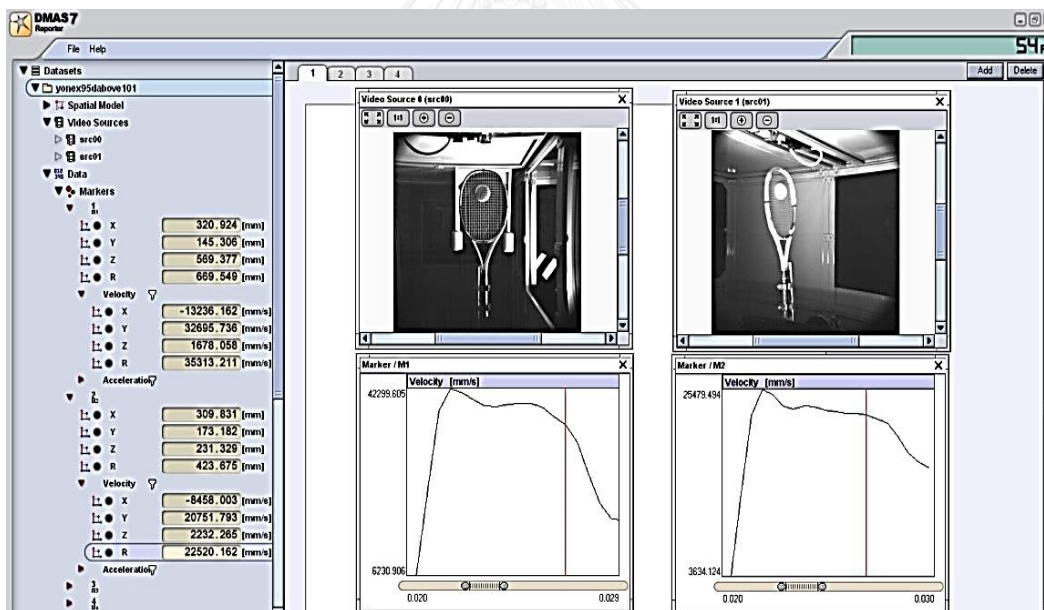


(c)

**รูปที่ 14** แสดงวิธีในการวิเคราะห์ภาพที่มีความเที่ยงตรงและถูกต้อง (precise and accurate tracking) ขณะลูกเทนนิสเข้ากระทบเอ็นบนหน้าหน้าไม้แรกเกิดรูปแบบโครงสร้าง RR ณ ตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) ด้วยชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ โดย (a) ภาพก่อนที่ลูกเคลื่อนเข้ากระทบเอ็น (ball inbound), (b) ภาพที่ 4 ขณะเข้ากระทบเต็มลูก (at the 4<sup>th</sup> frame of ball inbound) และ (c) ภาพที่ 8 การเริ่มเคลื่อนที่ของลูกออกจากหน้าไม้แรกเกิด



(a)



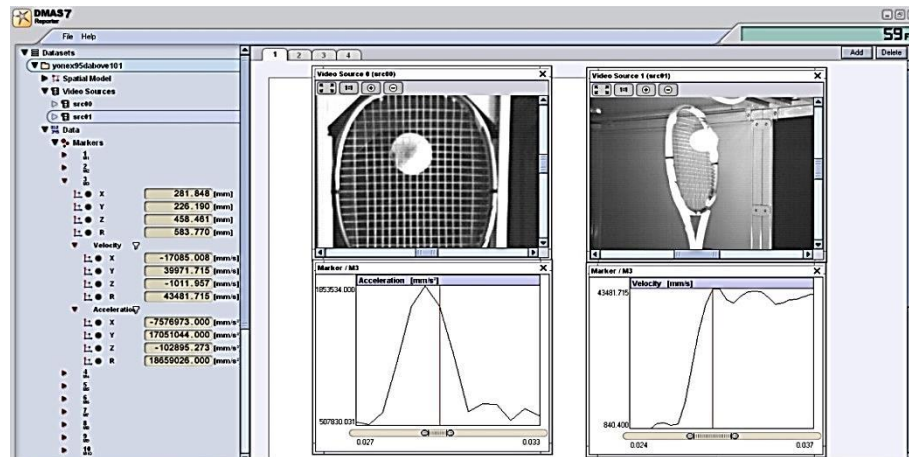
(b)

รูปที่ 15 แสดงรูปภาพค่าอัตราเร่งและค่าความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด (acceleration and maximum velocity of ball) หลังกระทบหน้าไม้แรกเกิด RR ณ จุดกระทบตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. เรียงตามลำดับ [รูปภาพบน: 15 (a)] รวมถึงความเร็วตำแหน่งปลายหัวไม้ (top: M1) และต่ำสุด (bottom: M2) [รูปภาพล่าง: 15 (b)] ซึ่งแสดงถึงค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบ โดยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบเทนนิสในห้องปฏิบัติการ

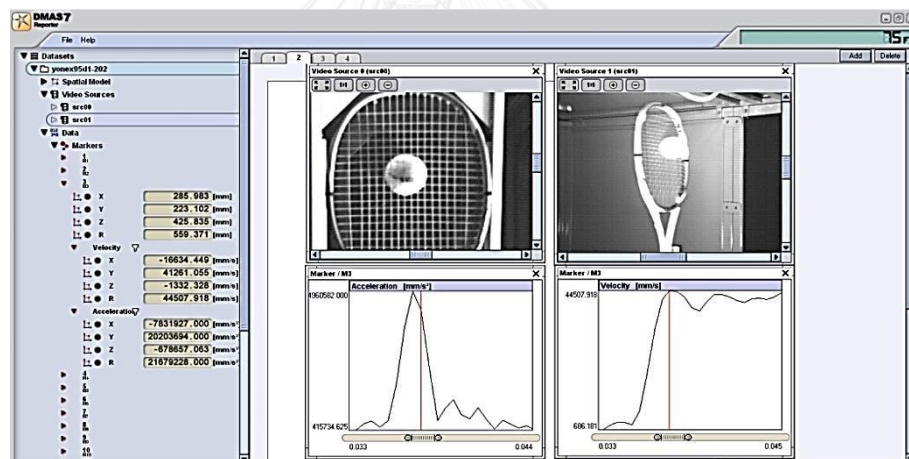
ในขณะที่ค่าความเร็วของไม้แร็กเกตโครงสร้าง RR ก่อนกระทบ ณ จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) ดังรูปที่ 15 (b) พบว่าความเร็วตำแหน่งปลายหัวไม้ (top: M1) ตามรูปกราฟด้านซ้าย และตำแหน่งต่ำสุดของหัวไม้แร็กเกต (bottom: M2) ตามรูปกราฟด้านขวามีค่าเท่ากับ 39.313 และ 22.520 เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ ซึ่งนำมาคำนวณหาค่าความเร็วก่อนกระทบของไม้แร็กเกตโครงสร้าง RR (Racket inbound velocity) ณ จุดกระทบที่ 1 ได้เท่ากับ 30.916 เมตรต่อวินาที โดยค่าเฉลี่ยความเร็วก่อนกระทบของไม้โครงสร้าง RR (Pre-impact racket velocity, n=5) ทั้ง 5 ตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก เท่ากับ  $30.903 \pm 0.291$ ,  $30.840 \pm 0.388$ ,  $30.823 \pm 0.363$ ,  $30.797 \pm 0.177$  และ  $30.802 \pm 0.332$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบหน้าไม้ (Pre-impact ball velocity, n=5) ของไม้แร็กเกต RR ในตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 คือ  $2.244 \pm 0.235$ ,  $2.612 \pm 0.153$ ,  $3.387 \pm 0.273$ ,  $3.678 \pm 0.121$  และ  $3.329 \pm 0.130$  เมตรต่อวินาที มีค่าเรียงตามลำดับจากน้อยไปมาก คงเนื่องมาจากจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. อยู่ใกล้ปลายหัวไม้เทนนิส มีระยะทางจากจุดปล่อยลูกเทนนิสสั้นกว่าจุดกระทบอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกันในช่วง 5 ตำแหน่ง พบว่า ค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนเข้ากระทบของแต่ละตำแหน่งมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ  $p < 0.05$  ยกเว้นจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับจุดกระทบที่ 5 (30, 0) ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่แย่งออกไปทางขวาเท่านั้น โดยจุดกระทบที่ 4 (0, -30) มีค่ามากที่สุด เพราะเป็นตำแหน่งจุดกระทบที่อยู่ต่ำสุด

ยังพบอีกว่า ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (Post-impact ball velocity, n=5) ณ จุดกระทบตำแหน่ง 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) เท่ากับ  $43.482 \pm 0.245$  เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$  ดังตารางที่ 1) โดยมีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบตำแหน่ง 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30: an half a ball distance above GSC) เท่ากับ  $44.436 \pm 0.226$  เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) มีค่ามากที่สุด และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบตำแหน่งที่ 3 ถึง 5 ของโครงสร้างไม้แร็กเกต RR เท่ากับ  $43.701 \pm 0.194$ ,  $43.668 \pm 0.161$  และ  $43.578 \pm 0.178$  เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) เรียงตามลำดับ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสที่รองลงมาจากจุดกระทบตำแหน่ง 2 คือ ความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบตำแหน่ง 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC), รองลงมาอีกคือ จุดกระทบตำแหน่ง 4 (0, -30) และจุดกระทบตำแหน่ง 5 (30, 0) โดยตำแหน่งจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสต่ำที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระหว่างจุดกระทบดังกล่าว (ตำแหน่งจุดกระทบที่ 1, 3, 4 และ 5) โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (Post-impact ball velocity) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30)

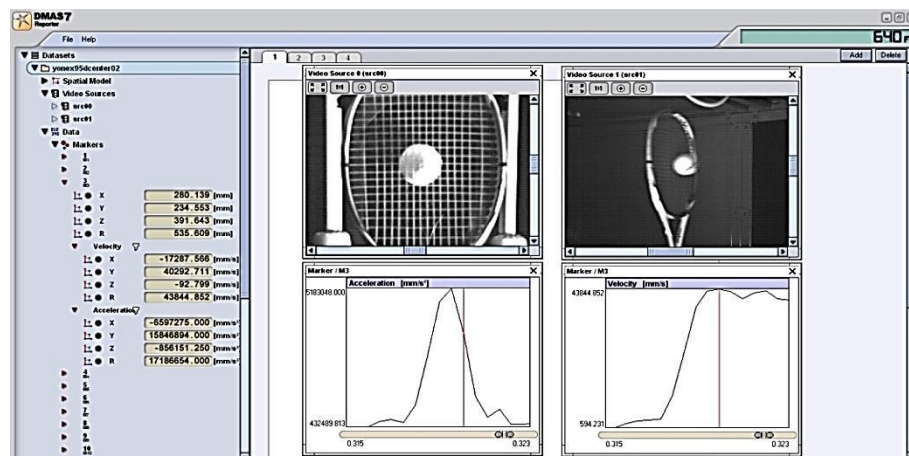
ซึ่งมีค่าสูงสุด จึงมีค่ามากกว่า ตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 1.681 ทั้งนี้ ในจุดกระทบที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับจุดกลางหน้าไม้แร็กเกต พบว่า ค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.506 มีแนวโน้มลดลงมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบอื่นๆ โดยจุดกระทบที่ 4 มีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.076 และจุดกระทบที่ 5 มีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.281



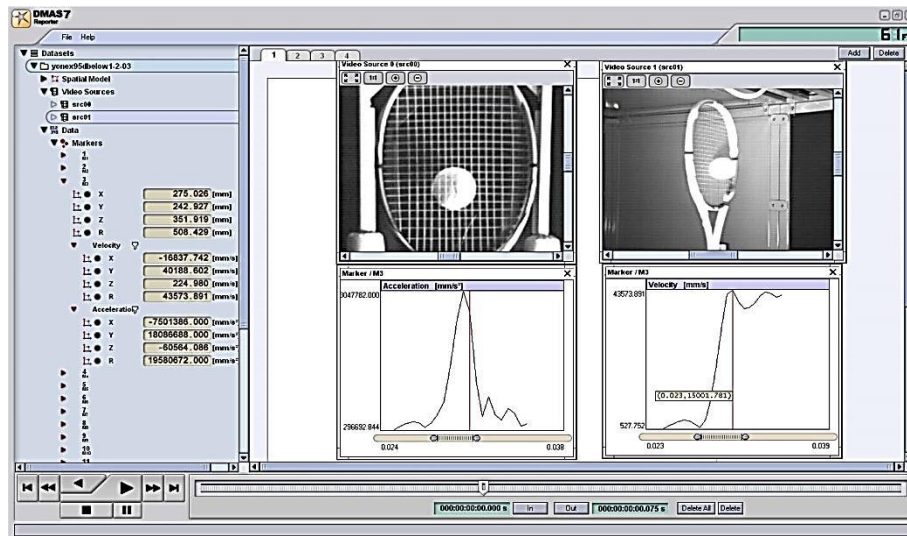
(P1)



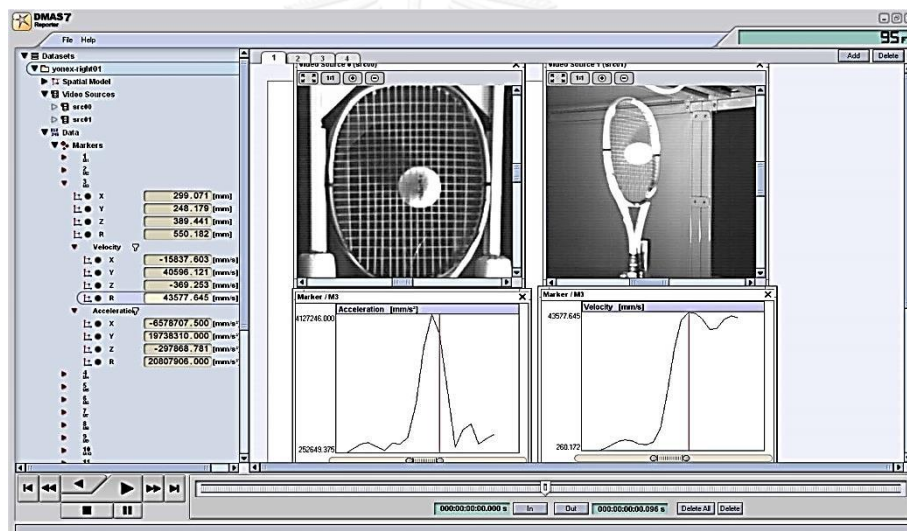
(P2)



(P3)



(P4)



(P5)

รูปที่ 16 แสดงตำแหน่งจุดกระทบและรูปภาพอัตราเร่งและความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด (acceleration and maximum velocity of ball) หลังกระทบหน้าไม้แร็กเกต RR ณ จุดกระทบ ตำแหน่งที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (P1; 0, 60 รูปภาพแรก), จุดกระทบที่ 2 (P2; 0, 30), จุดกระทบที่ 3 (P3-GSC; 0, 0), จุดกระทบที่ 4 (P4; 0, -30) และจุดกระทบที่ 5 (P5; 30, 0) เรียงตามลำดับ โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ

**ตารางที่ 1** แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกต RR คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket) และความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball) ในแต่ละจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง (mean±SD) รวมถึงแสดงค่าอัตราเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 450 rpm

Parameters	Impact Locations (n=5) of Racket-RR Model				
	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)
<b>Ball Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Pre-impact	2.244 ± 0.235 *	2.612 ± 0.153 *	3.387 ± 0.273	3.678 ± 0.121 *	3.329 ± 0.130
- Post-impact (max)	43.482 ± 0.245	44.436 ± 0.226 **	43.701 ± 0.194	43.668 ± 0.161	43.578 ± 0.178
<b>Racket Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Top of racket head	39.167 ± 0.268	39.403 ± 0.259	39.494 ± 0.362	39.235 ± 0.271	39.462 ± 0.388
- Bottom of racket head	22.638 ± 0.246	22.288 ± 0.272	22.153 ± 0.275	22.355 ± 0.259	22.142 ± 0.299
- Pre-impact	30.903 ± 0.291	30.840 ± 0.388	30.823 ± 0.363	30.797 ± 0.178	30.802 ± 0.332
<b>Smash Ratio</b>					
- $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.406 ± 0.015	1.444 ± 0.012 **	1.415 ± 0.008	1.413 ± 0.018	1.412 ± 0.016

\* Significant difference from at GSC impact location in RR.

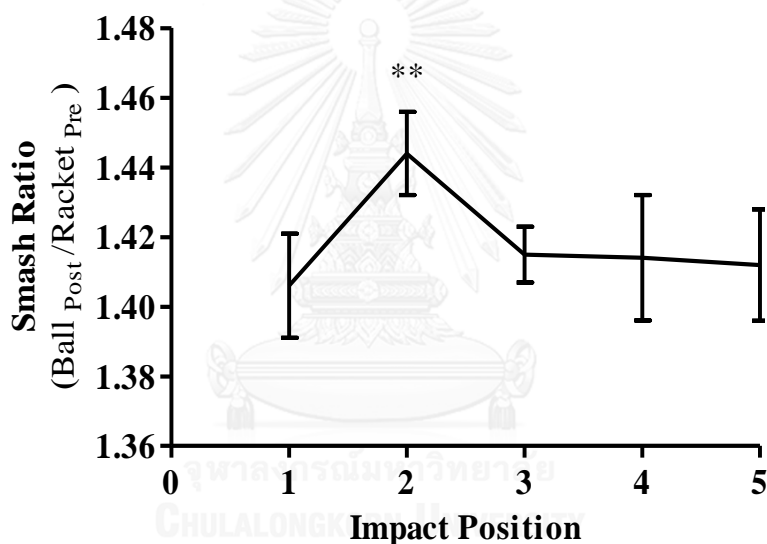
\*\* Significant difference from the other impact locations in RR.

ทั้งนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ (Post-impact ball to Pre-racket velocity ratio:  $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) โครงสร้างไม้แร็กเกต RR ณ จุดกระทบที่ 1 ถึง 5 มีค่า  $1.406 \pm 0.015$ ,  $1.444 \pm 0.012$ ,  $1.415 \pm 0.008$ ,  $1.413 \pm 0.018$  และ  $1.412 \pm 0.016$  เรียงตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกตนี้ (Smash ratio) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30) จึงมีค่าสูงที่สุด และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ ดังรูปที่ 17 และค่าอัตราส่วนรองลงมาคือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ซึ่งใกล้เคียงกับจุดกระทบที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, -30) และจุดกระทบที่ 5 เอียงออกจากจุดกลางไปทางขวา (30, 0) โดยค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้ จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบ



กันทั้ง 5 ตำแหน่งของไม้แร็กเกต RR โดยค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. จึงมีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 2.049 เช่นกัน ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับจุดกลางหน้าไม้แร็กเกต ค่าอัตราส่วนนี้ ณ จุดกระทบที่ 1 มีค่าลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 0.636 ยังคงมีแนวโน้มลดลงมากกว่าจุดอื่น ๆ เช่นเดิม โดยจุดกระทบที่ 4 มีค่าลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 0.076 และจุดกระทบที่ 5 มีค่าลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 0.281 ซึ่งค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกตนี้ (Smash ratio) สอดคล้องกับข้อมูลค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (Post-impact velocity of ball)

**The Ball-Racket Interaction of Flat Serve**



\*\* Significantly different from other impact locations in RR.

**รูปที่ 17** แสดงการเปรียบเทียบกราฟค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Smash ratio: Ball<sub>post</sub>/Racket<sub>pre</sub>) ทั้ง 5 ตำแหน่งจุดกระทบ ในรูปแบบโครงสร้าง RR โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลตด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 450 rpm

## 2) อภิปรายผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR

จากการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แรกเกิดจากรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์แรกคือ RR ด้วยการจำลองการเสิร์ฟฟลูคแพลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องขณะลูกกระทบเอ็นบนหน้าไม้เทนนิสแบบ 3 มิติ พบว่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 1 (0, 60) ของไม้แรกเกิด RR หลังจกลูกกระทบเอ็นบนหน้าไม้ เท่ากับ 43.48 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) ดังรูปกราฟที่ 15 (a) (กราฟด้านขวา) สอดคล้องกับโซว์และคณะ (Chow et al., 2003) ที่รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการเสิร์ฟฟลูคแรกและลูกที่สองจากนักเทนนิสประเภทเดี่ยวในกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า ปี ค.ศ. 1996 พบว่า การเสิร์ฟฟลูคแรกนั้น มีความเร็วของลูกเสิร์ฟมากกว่าการเสิร์ฟฟลูคที่สองถึง 24.1 % โดยในประเภทชายเดี่ยว (ค่าเฉลี่ยความเร็วของลูกเสิร์ฟฟลูคแรกต่อลูกที่สอง เท่ากับ 50.33 vs. 37.80  $\text{ms}^{-1}$ ,  $p < 0.01$ ) และในประเภทหญิงเดี่ยว (ความเร็วของลูกเสิร์ฟฟลูคแรกต่อลูกที่สอง เท่ากับ 42.06 vs. 32.70  $\text{ms}^{-1}$ ,  $p < 0.01$ ) ทั้งนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (Post-impact ball velocity,  $n=5$ ) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 60) เท่ากับ  $44.436 \pm 0.226$  เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) มีค่ามากที่สุด ดังตารางที่ 1 และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 5 ตำแหน่ง ทั้งนี้คงเนื่องจากจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมพอดีสำหรับความเร็วเฉลี่ยของไม้แรกเกิดในการเสิร์ฟฟลูคแพลท์ เพราะเป็นตำแหน่งที่อยู่ค่อนข้างไปทางปลายหัวไม้แรกเกิด หรือมีคาร์คิมิยามากกว่าจุดกลางหน้าไม้แรกเกิด [GSC; ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ผลการกระทบระหว่างเอ็นบนหน้าไม้และลูกเทนนิส ( $e_A$ : apparent coefficient of restitution) มีค่ามากที่สุด: Cross, 2002] และประการที่สองคือ ตำแหน่งจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีแนวโน้มที่ลูกเทนนิสเกิดการกระทบในขณะที่ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ( $30.840 \pm 0.388 \text{ ms}^{-1}$ ) มีค่ามากกว่าจุดกลางหน้าไม้แรกเกิด ( $30.823 \pm 0.363 \text{ ms}^{-1}$ ) ดังตารางที่ 1 อย่างไรก็ตาม ไม้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างจุดกระทบกลุ่มดังกล่าวนี้ ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสรองลงมาจากจุดกระทบที่ 2 คือ จุดกระทบตำแหน่ง 3 จุดกลางหน้าไม้แรกเกิด (GSC), จุดกระทบตำแหน่ง 4 (0, -30) และจุดกระทบตำแหน่ง 5 (30, 0) โดยตำแหน่งจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสต่ำที่สุด ทั้งๆที่ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้จริง (absolute racket swing speed) ณ จุดกระทบที่ 1 โกล์ปลายหัวไม้ มีค่าสูงมากถึง  $33.72 \pm 0.317 \text{ ms}^{-1}$  แต่ค่าสัมประสิทธิ์ผลการกระทบระหว่างเอ็นบนหน้าไม้และลูกเทนนิสน่าจะลดลงอย่างมาก หรือมากกว่าผลของค่าความเร็วของไม้แรกเกิดที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. จึงมีค่า

มากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แรกเกิดเฉลี่ย ร้อยละ 1.681 สอดคล้องกับชอปปิน (Choppin, 2013) ได้ศึกษาถึงความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจากโมเดลที่ใช้ทำนายและการทดลองในห้องปฏิบัติการ รายงานว่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสขณะไม้เทนนิสมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมากอย่างเช่นการเสิร์ฟฟลูก ตำแหน่งจุดกระทบที่เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเดิมที่เป็นจุดทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (the first sweet spot; vibration node) และเรียกชื่อจุดกระทบนี้ว่า “Power point” ที่อยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้ประมาณ 28 มม. (0.028 เมตร) ขณะความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย ( $\omega$ ) ของไม้แรกเกิดเท่ากับ 40.0 เรเดียนต่อวินาที ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) หรือความเร็วของไม้แรกเกิดเทียบเท่ากับขณะตีลูกโฟร์แฮนด์ อย่างไรก็ตาม ถ้าความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของไม้แรกเกิดเพิ่มขึ้นเป็น 50.9 เรเดียนต่อวินาที เทียบเท่ากับขณะการเสิร์ฟฟลูกแรก ตำแหน่งจุดกระทบที่เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการนำจะอยู่เหนือขึ้นไปทางปลายหัวไม้ อยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้ประมาณ 50 มม. (0.050 เมตร) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากในการวิจัยครั้งนี้ (ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม.) ทั้งนี้ ความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสน้อยที่สุด ถึงแม้ว่ามีค่ารัศมีจะมากกว่าจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. สอดคล้องกับบรอดดีและโรเบิร์ต (Brody & Roebert, 2004) ได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้โดยสร้างเฟรมอ้างอิงในการทดลอง (frame of reference) ในห้องปฏิบัติการ รายงานว่าจุดกระทบในการกระเด็นของลูกเทนนิสจะน้อยที่สุด (dead spot) อยู่บริเวณใกล้ขอบปลายของหัวไม้แรกเกิด เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การกระทบระหว่างเอ็นบนหน้าไม้และลูกเทนนิสลดลงอย่างมาก

ทั้งนี้ ชุดอุปกรณ์ควบคุมลูกเทนนิส สามารถปล่อยลูกลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิสคล้ายกับการเสิร์ฟจริง โดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact ball velocity) ของไม้แรกเกิดโครงสร้าง RR ในตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 คือ  $2.244 \pm 0.235$ ,  $2.612 \pm 0.153$ ,  $3.387 \pm 0.273$ ,  $3.678 \pm 0.121$  และ  $3.329 \pm 0.130$  เมตรต่อวินาที มีค่าจากน้อยไปมากเรียงตามลำดับ ดังตารางที่ 1 สอดคล้องกับรายงานการวิจัยในการเสิร์ฟฟลูกแรกของโชว์และคณะ (Chow et al., 2003) จากการแข่งขันกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า พบว่า ความเร็วลูกเทนนิสก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยวและในประเภทหญิงเดี่ยว เท่ากับ  $3.86 \text{ ms}^{-1}$  และ  $4.12 \text{ ms}^{-1}$  เรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งทั้ง 5 จุดกระทบ พบว่า ค่าความเร็วลูกเทนนิสก่อนเข้ากระทบของแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ยกเว้นตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับตำแหน่งจุดกระทบที่ 5 (30, 0) ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา โดยจุดกระทบที่ 4 (0, -30) มีค่ามากที่สุด เนื่องจากเป็นจุดกระทบที่อยู่ต่ำสุด ตามแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพและขีดความสามารถของเครื่องมือที่มีความละเอียด

เพียงพอในการแยกแยะความแตกต่าง (sensitivity analysis) ของระยะห่างของแต่ละตำแหน่งจุดกระทบเพียง 30 มิลลิเมตรเท่านั้น ในขณะที่ค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (Pre-impact racket velocity) ไม้แร็กเกตโครงสร้าง RR ทั้ง 5 ตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ  $30.903 \pm 0.291$ ,  $30.840 \pm 0.388$ ,  $30.823 \pm 0.363$ ,  $30.797 \pm 0.177$  และ  $30.802 \pm 0.332$  เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) เรียงตามลำดับ เนื่องจากได้กำหนดค่าระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูง ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 450 rpm ( $\omega = 47.14 \text{ rad.s}^{-1}$ ) เท่ากัน โดยมีค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ขณะที่ความเร็วคงที่ของไม้แร็กเกตโครงสร้าง RR เท่ากับ 49.98 องศาต่อวินาที ( $\text{rad.s}^{-1}$ ) ซึ่งอิสระจากแรงผลักของมอเตอร์ ดังนั้นค่าเฉลี่ยความเร็วก่อนกระทบของไม้แร็กเกต RR ก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ทั้ง 5 จุดกระทบใกล้เคียงกันมากมีค่าอยู่ระหว่าง 30.79 ถึง 30.90 เมตรต่อวินาที สอดคล้องกับรายงานการวิจัยโซว์และคณะ (Chow et al., 2003) เกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกแรกในการแข่งขันกีฬาโอลิมปิกแอตแลนต้า พบว่า ความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยวและในประเภทหญิงเดี่ยว เท่ากับ  $38.57 \text{ ms}^{-1}$  และ  $30.81 \text{ ms}^{-1}$  เรียงตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง พบว่าจุดกระทบที่ 1 มีแนวโน้มมีค่ามากกว่าจุดกระทบอื่นๆ เนื่องจากเป็นจุดกระทบที่อยู่เหนือสุดจึงเกิดการกระทบก่อน โดยความเร็วของไม้แร็กเกตค่อยๆลดลงตามแรงเฉื่อยที่อิสระจากแรงผลักของมอเตอร์ แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าดังกล่าวมีแนวโน้มน้อยลงเรียงตามลำดับของตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ คือ จุดกระทบ 2, 3 และ 4 ดังรูปที่ 17 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการทดลองและควบคุมตัวแปรต่างๆได้ค่อนข้างดี

ในตารางที่ 1 และรูปที่ 17 แสดงถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) ณ จุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่งของไม้แร็กเกตรูปแบบโครงสร้าง RR พบว่า ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกตของลูกเทนนิส (Smash ratio) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30) มีค่าสูงที่สุด ( $1.444 \pm 0.012$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับในตำแหน่งอื่นๆที่เหลือ และยังพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  สอดคล้องกับภาสกร วัธนธาดา และคณะ (2548) ที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟกับระดับความสูงลูกเทนนิสขณะกระทบหน้าแร็กเกต โดยจำลองการแข่งขันแมทช์ประเภทชายเดี่ยวจากนักเทนนิสชายทั้งสองคนสังกัดลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทย พบว่า ความเร็วเฉลี่ยของเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สอง ประมาณ 110 และ 89 ไมล์ต่อชั่วโมง เรียงตามลำดับ โดยมีระดับความสูงลูกเทนนิสขณะกระทบหน้าแร็กเกตทั้งลูกแรกและลูกที่สอง เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20-22 นิ้ว เนื่องจากบริเวณข้อมือขวา โดยการเสิร์ฟลูกแรกจะอยู่สูงกว่าลูกที่สอง เฉลี่ยประมาณ 1 นิ้ว (ประมาณ 25.4 มม.) อย่างไรก็ตามพบว่า

ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต ณ จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าน้อยที่สุด ( $1.406 \pm 0.015$ ) ทั้งนี้เนื่องจากจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. หรืออยู่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงขอบหัวไม้แร็กเกต จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบระหว่างเอ็นบนหน้าไม้และลูกเทนนิสลดลงอย่างมาก (Brody & Roebert, 2004; Cross, 2002) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีค่ามากที่สุดที่บริเวณจุดศูนย์กลางหน้าไม้แร็กเกตที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (first sweet spot; vibration node) โดยค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้ (Smash ratio) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. จึงมีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049 สอดคล้องกับโดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส (Post-impact ball velocity) ณ จุดกระทบที่ 2 ซึ่งมีค่ามากกว่าจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกตเฉลี่ยร้อยละ 1.681 ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. น่าจะเป็นจุดกระทบที่ดีที่สุดสำหรับการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ ในขณะที่แข่งขัน ขณะความเร็วของหน้าไม้แร็กเกตก่อนกระทบลูกเทนนิสเฉลี่ย เท่ากับ 30.84 เมตรต่อวินาที หรือมีความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกตเฉลี่ย 49.98 เรเดียนต่อวินาที

### 3) สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR

ผลการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกตจากรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์แรกคือ RR ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องขณะลูกกระทบเอ็นบนหน้าไม้เทนนิสแบบ 3 มิติ พบว่า ชุดอุปกรณ์ความคุมลูกเทนนิส สามารถปล่อยลูกลงมาจากด้านบนหน้าไม้เทนนิสคล้ายกับการเสิร์ฟจริงโดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact ball velocity) ของไม้แร็กเกต RR ในตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 คือ  $2.244 \pm 0.235$ ,  $2.612 \pm 0.153$ ,  $3.387 \pm 0.273$ ,  $3.678 \pm 0.121$  และ  $3.329 \pm 0.130$  เมตรต่อวินาที มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งทั้ง 5 จุดกระทบ พบว่า ค่าความเร็วลูกเทนนิสก่อนเข้ากระทบของแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ยกเว้นตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับตำแหน่งจุดกระทบที่ 5 (0, 30) ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เอียงออกจากจุดกลางไปทางขวา ขณะที่ค่าความเร็วก่อนกระทบบนเอ็นหน้าของไม้แร็กเกต RR (Pre-impact racket velocity) ทั้ง 5 ตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันมากอยู่ระหว่าง 30.79 ถึง 30.90 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าความเร็วก่อนกระทบจุดกระทบที่ 1 มีแนวโน้มมีค่ามากกว่าจุดกระทบอื่นๆ แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเรียงตามลำดับของตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือตามแกนแนวตั้ง

ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังจากลูกกระทบเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (Post-impact ball velocity,  $n=5$ ) ของโครงสร้าง RR ณ จุดกระทบที่ 2. เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30) เท่ากับ  $44.436 \pm 0.226$  เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) มีค่ามากที่สุด และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลืออีก 4 จุดกระทบ (จุดกระทบที่ 1, 3, 4 และ 5) ซึ่งมีค่า  $43.482 \pm 0.245$ ,  $43.701 \pm 0.194$ ,  $43.668 \pm 0.161$  และ  $43.578 \pm 0.178$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดรองลงมาคือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) โดยค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสน้อยที่สุด ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่ามากกว่า ตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 1.681 สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) ไม้แร็กเกต RR ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่าสูงที่สุด ( $1.444 \pm 0.012$ ) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ โดยค่าเฉลี่ยอัตราส่วนรองลงมาคือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ซึ่งใกล้เคียงกับจุดกระทบที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, -30) และจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา (30, 0) และค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้ ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต (Smash ratio) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่ามากกว่า ตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049 เป็นการยืนยันว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. น่าจะเป็นจุดกระทบที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ ขณะที่ค่าความเร็วของหน้าไม้แร็กเกตก่อนกระทบลูกเทนนิสเฉลี่ย 30.84 เมตรต่อวินาที หรือมีความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกต เท่ากับ 49.98 เรเดียนต่อวินาที

ดังนั้นดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 1.2 เป็นการศึกษาวิจัยใน 3 รูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (RR, RT และ RO) เพื่อยืนยันว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. จะเป็นจุดกระทบที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ในสามรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ และพิสูจน์หาความแตกต่างในสามรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตก่อน ที่จะสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบต่างๆบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ต่อไป

#### 4) ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ใน 3 รูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (RR, RT และRO) เพื่อพิสูจน์ความแตกต่างใน 3 รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต เพื่อสร้างโมเดล

ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆจากการทดสอบในการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในแต่ละผลิตภัณฑ์ตามกระบวนการทดสอบ โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูง ความเร็วรอบมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm กำหนดตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส 5 ตำแหน่ง จุดกระทบที่แตกต่างกัน เลือกลูกเทนนิสที่กระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุดตำแหน่งละ 5 ลูก แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องแบบ 3 มิติ ทำการพิสูจน์ความแตกต่างของค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกในแต่ละตำแหน่ง และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนดังกล่าวระหว่าง 3 รูปแบบโครงสร้าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการนี้ มาสร้างโมเดล/สมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ตามกรอบแนวความคิดในการวิจัย (บทที่ 2) มีรายละเอียดดังนี้

แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตอันใหม่และรุ่นเดียวกับที่นักเทนนิสทีมชาตินิยมใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขันระดับนานาชาติ พบว่ารูปแบบโครงสร้างหน้าไม้ในผลิตภัณฑ์ทั้งสามโครงสร้างคือ สีเหลี่ยม (RR) , สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) ทำจากวัสดุชนิด Graphite เหมือนกัน แตกต่างกันที่รูปแบบโครงสร้างและวัสดุส่วนประกอบเพิ่มเติม ในภาคผนวก ข ไม้แร็กเกตทั้งสามโครงสร้างมีความยาวเท่ากัน 68.58 ซม. มีน้ำหนักพร้อมเอ็นที่ขึ้นแล้วมีค่าระหว่าง 312-338 กรัม ขนาดหน้าไม้แร็กเกตมีพื้นที่ระหว่าง 95-100 ตารางนิ้ว ซึ่งเป็นหน้าไม้ขนาด Mid-plus (พื้นที่ 94-105 ตร.น) ทั้งนี้โมเมนต์ความเฉื่อยที่เกิดขึ้นขณะการออกแรงตี (moment of inertia) หรือน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (swing weight) มีค่าระหว่าง 317-327 ค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต (stiffness) มีค่าระหว่าง 52-63 และส่วนใหญ่มีจุดสมดุลของน้ำหนักไม้ (balance) มาก ซึ่งเป็นระยะห่างจากจุดสมดุลของมวลไม้แร็กเกต (racket mass) ถึงปลายหัวไม้ ดังนั้นไม้แร็กเกต RT มีพื้นที่หน้าไม้มากที่สุด ส่วนค่าน้ำหนักการกระจายแรงเหวี่ยงของโครงสร้างไม้ RO มีค่ามากที่สุด โดยค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต RR เท่ากับ RO และมากกว่า RT และส่วนใหญ่มีจุดสมดุลของน้ำหนักไม้ นับจากปลายหัวไม้มาก คือ 7 (น้ำหนักที่หัวไม้เบา) ยกเว้น RO ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 แสดงถึงน้ำหนักที่หัวไม้มากกว่า เป็นไปตามคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์และอยู่ในข้อกำหนดสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (ITF, 2009)

**ตารางที่ 2** แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง (RR, RT และ RO) คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball), ความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket) และอัตราเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ในแต่ละจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง (mean $\pm$ SD) รวมถึงอัตราเฉลี่ยรวมสามไม้แร็กเกต (3R) โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการกำหนดความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 450 rpm

Parameters	Impact Locations (n=5) of 3 Characteristic Rackets				
	P1: (0, 60) (one-ball above)	P2: (0, 30) (half- ball above)	P3: (0, 0) (GSC-center)	P4: (0, -30) (half-ball below)	P5: (-30, 0) ( off-center)
<b>Racket-RR</b>					
<b>Ball Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Post-impact (max)	43.482 $\pm$ 0.245	44.436 $\pm$ 0.226	43.701 $\pm$ 0.194	43.668 $\pm$ 0.161	43.578 $\pm$ 0.178
<b>Racket Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Pre-impact	30.903 $\pm$ 0.291	30.840 $\pm$ 0.388	30.823 $\pm$ 0.363	30.795 $\pm$ 0.178	30.802 $\pm$ 0.332
<b>Smash Ratio</b>					
- $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.406 $\pm$ 0.015	1.444 $\pm$ 0.012	1.415 $\pm$ 0.008	1.413 $\pm$ 0.018	1.412 $\pm$ 0.016
- Difference from GSC (%)	- 0.636	+ 2.049	0	- 0.076	- 0.281
<b>Racket-RT</b>					
<b>Ball Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Post-impact (max)	43.856 $\pm$ 0.353	45.401 $\pm$ 0.769	44.480 $\pm$ 0.803	44.215 $\pm$ 0.836	43.929 $\pm$ 0.842
<b>Racket Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Pre-impact	30.926 $\pm$ 0.284	30.895 $\pm$ 0.240	30.816 $\pm$ 0.360	30.804 $\pm$ 0.285	30.828 $\pm$ 0.210
<b>Smash Ratio</b>					
- $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.416 $\pm$ 0.019	1.475 $\pm$ 0.036	1.442 $\pm$ 0.032	1.445 $\pm$ 0.042	1.437 $\pm$ 0.057
- Difference from GSC (%)	- 1.803	+ 1.872	0	+ 0.208	- 0.347
<b>Racket-RO</b>					
<b>Ball Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Post-impact (max)	43.812 $\pm$ 0.930	45.491 $\pm$ 0.705	44.439 $\pm$ 0.632	44.335 $\pm$ 0.844	44.309 $\pm$ 0.912
<b>Racket Velocity (m·s<sup>-1</sup>)</b>					
- Pre-impact	30.977 $\pm$ 0.247	30.899 $\pm$ 0.299	30.884 $\pm$ 0.221	30.799 $\pm$ 0.304	30.743 $\pm$ 0.334
<b>Smash Ratio</b>					
- $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.404 $\pm$ 0.029	1.472 $\pm$ 0.030	1.452 $\pm$ 0.057	1.451 $\pm$ 0.053	1.449 $\pm$ 0.044
- Difference from GSC (%)	- 3.305	+ 1.377	0	- 0.069	- 0.207
<b>Racket-Model</b>					
<b>Smash Ratio (3R)</b>					
- $Ball_{post}/Racket_{pre}$	1.409 $\pm$ 0.021	1.462 $\pm$ 0.029	1.436 $\pm$ 0.039	1.433 $\pm$ 0.042	1.429 $\pm$ 0.036
- Difference from GSC (%)	- 1.880	+ 1.811	0	- 0.208	- 0.487



ในตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสในสามรูปแบบโครงสร้าง ที่ทำจากวัสดุชนิดกราฟไฟท์เหมือนกัน อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างกันที่รูปร่างโครงสร้าง รวมถึงมีพื้นที่ขนาดหน้าไม้แรกเกิด น้ำหนักการกระจายแรงเหวี่ยงและความแข็งแกร่งของไม้แรกเกิด จุดสมดุลของน้ำหนักไม้แรกเกิดที่ต่างกัน หลังขึ้นเอ็นให้มีความตึงเริ่มต้นเท่ากัน 60 ปอนด์ ครบเวลา 1 ชั่วโมงแรกค่าความตึงของโครงสร้างหน้าไม้ RR, RT และ RO ลดลงเหลือเพียง 56.8, 53.8 และ 54.9 ปอนด์ เรียงตามลำดับ ทั้งนี้ความตึงของเอ็นบนหน้าไม้ทั้งสามโครงสร้างผลิตภัณฑ์มีการลดลงเรื่อยๆ แต่จะมีค่าค่อนข้างคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงน้อยในช่วงเวลาประมาณ 3 วันต่อมา โดยมีค่าความตึงประมาณ 54.9, 50.8 และ 53.4 ปอนด์ เรียงตามลำดับ โดยโครงสร้างหน้าไม้แรกเกิด RT และ RO มีแนวโน้มเกิดการลดลงของค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้มากกว่าของโครงสร้าง RR ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากรูปแบบโครงสร้างและวัสดุส่วนประกอบเพิ่มเติมที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 5 ตำแหน่งจุดกระทบในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) ทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง คือ RR, RT และ RO เท่ากับ  $44.436 \pm 0.226$ ,  $45.401 \pm 0.769$  และ  $45.491 \pm 0.705$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 2 ของโครงสร้างไม้แรกเกิด RO (วงรี) และ RT (สามเหลี่ยม) มีแนวโน้มมากกว่า RR (สี่เหลี่ยม)

**ตารางที่ 3** แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แรกเกิดทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง และจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง ของค่าเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball)

ตัวแปร	F	df	p-value	การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวน
<b>Ball Velocity</b>				
<b>Post-impact</b>				
- Racket	8.307	2	p < 0.05	[RR] - [RT, RO]
- Position	22.46	4	p < 0.05	[P1] - [P2] - [P3] - [P4, P5]
- Racket*	.689	8	p > 0.05	[RR, RT, RO * P1, P2, P3, P4, P5]
<b>Position</b>				

ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส รองลงมาจากจุดกระทบที่ 2 คือ จุดกระทบที่ 3 (GSC) ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างเหมือนกัน มีค่าเรียงลำดับตามโครงสร้าง คือ  $43.701 \pm 0.194$ ,  $44.480 \pm 0.803$  และ  $44.439 \pm 0.632$  เมตรต่อวินาที ซึ่งค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ จุดกระทบที่ 3 ของโครงสร้างไม้แร็กเกต RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) มีแนวโน้มมากกว่า RR (สี่เหลี่ยม) เช่นกัน พบอีกว่า ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส จุดกระทบที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามรูปแบบโครงสร้างคือ  $43.482 \pm 0.245$ ,  $43.856 \pm 0.353$  และ  $43.812 \pm 0.930$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับรูปแบบโครงสร้างทั้งสาม ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ภายหลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง และจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง พบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือในสามรูปแบบโครงสร้าง ดังตารางที่ 3 ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส หลังกระทบระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสาม พบว่ารูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต RO (วงรี) และ RT (สามเหลี่ยม) มีค่ามากกว่า RR (สี่เหลี่ยม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตกับจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่ง

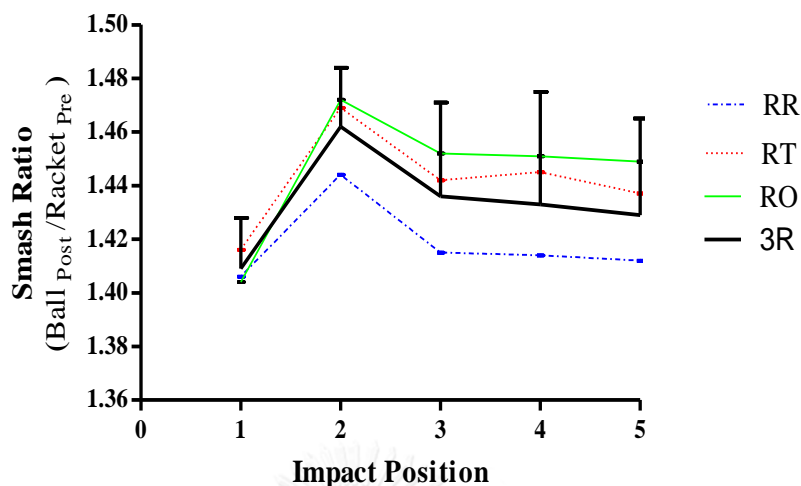
**ตารางที่ 4** แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง และจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง ของค่าเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of ball)

ตัวแปร	F	df	p-value	การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ภายหลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวน
<b>Ball Velocity</b>				
<b>Pre-impact</b>				
- Racket	.561	2	$p > 0.05$	[RR, RT, RO]
- Position	170.39	4	$p < 0.05$	[P1] - [P2] - [P3, P5] - [P4]
- Racket*	1.458	8	$p > 0.05$	[RR, RT, RO * P1, P2, P3, P4, P5]
<b>Position</b>				

ทั้งนี้ ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ความคมลูกเทนนิสสามารถปล่อยลูกลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิสคล้ายกับการโยนลูกเพื่อเสิร์ฟจริง โดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact ball velocity) ของไม้แรกเกิด RR ในตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 คือ  $2.244 \pm 0.235$ ,  $2.612 \pm 0.153$ ,  $3.387 \pm 0.273$ ,  $3.678 \pm 0.121$  และ  $3.329 \pm 0.130$  เมตรต่อวินาที มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ ในตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งทั้ง 5 จุดกระทบ พบว่าค่าความเร็วลูกเทนนิสก่อนเข้ากระทบของแต่ละตำแหน่งมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ  $p < 0.05$  ยกเว้นตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับตำแหน่งจุดกระทบที่ 5 (30, 0) ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แรกเกิดทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง พบว่า ค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบของรูปแบบโครงสร้างอีกสองรูปแบบ คือ RT และ RO มีข้อมูลดังกล่าวเช่นเดียวกับไม้แรกเกิด RR จึงพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ ยกเว้นตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับตำแหน่งจุดกระทบที่ 5 เช่นเดิม ดังตารางที่ 4 อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แรกเกิด รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แรกเกิดและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งด้วย

ในขณะที่ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (Pre-impact racket velocity) ของโครงสร้าง RR ทั้ง 5 ตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ  $30.903 \pm 0.291$ ,  $30.840 \pm 0.388$ ,  $30.823 \pm 0.363$ ,  $30.795 \pm 0.178$  และ  $30.802 \pm 0.332$  เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) เรียงตามลำดับดังตารางที่ 2 พบว่า จุดกระทบที่ 1 มีแนวโน้มมีค่ามากกว่าจุดกระทบอื่นๆ และค่าดังกล่าวน้อยลงเรียงตามลำดับของตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือนในโครงสร้างไม้แรกเกิด RR (ทั้ง 4 ตำแหน่งจุดกระทบตามแกนแนวตั้ง ดังรูปที่ 12) แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบอีกว่า ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบของรูปแบบโครงสร้างสองรูปแบบคือ RT และ RO มีข้อมูลดังกล่าวเช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 4 ทั้งนี้ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดก่อนกระทบ ณ จุดกระทบที่ 3 (GSC) ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง RR, RT และ RO มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 30.816 - 30.884 เมตรต่อวินาที ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แรกเกิดทั้ง 3 รูปแบบและจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง จึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งค่าระหว่างตำแหน่งจุดกระทบและค่าโครงสร้างไม้แรกเกิดทั้งสามรูปแบบ รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แรกเกิดและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งเช่นเดิม

### The Ball-Racket Interaction of Flat Serve



รูปที่ 18 แสดงกราฟค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Smash ratio:  $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบใน 3 รูปแบบโครงสร้าง (RR, RT และ RO) ทั้ง 5 ตำแหน่งจุดกระทบ รวมถึงค่าอัตราส่วนเฉลี่ยรวมสามไม้แร็กเกต (3R:  $mean \pm SD$ ) โดยจุดกระทบที่ 2 (0, 30) เหนือจุดกลาง 30 มม. มีค่าสูงที่สุดเช่นเดียวกัน โดยจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้าง และจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง ในอัตราเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ )

ตัวแปร	F	df	p-value	การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวน
<b>Ball Velocity</b>				
<b>Pre-impact</b>				
- Racket	2.563	2	$p > 0.05$	[RR, RT, RO]
- Position	12.502	4	$p < 0.05$	[P1] - [P2] - [P3] - [P4, P5]
- Racket*	.624	7	$p > 0.05$	[RR, RT, RO * P1, P2, P3, P4, P5]
<b>Position</b>				

ดังนั้นในตารางที่ 2 และรูปที่ 18 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิส หลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ณ จุดกระทบทั้ง 5 ของทั้งสามรูปแบบ โครงสร้างของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO พบว่าค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกต (Smash ratio) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเรียงลำดับตามรูปแบบโครงสร้างคือ  $1.444 \pm 0.012$ ,  $1.475 \pm 0.036$  และ  $1.472 \pm 0.030$  ซึ่งมีค่ามากกว่า ตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049, 1.872 และ 1.377 เรียงตามลำดับเช่นกัน โดยอัตราส่วนรองลงมาจากจุดกระทบที่ 2 คือ จุดกระทบที่ 3 (GSC) เหมือนกันทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง ซึ่งมีค่าเรียงลำดับคือ  $1.415 \pm 0.008$ ,  $1.442 \pm 0.032$  และ  $1.452 \pm 0.057$  ใกล้เคียงกับจุดกระทบที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. ( $1.413 \pm 0.018$ ,  $1.445 \pm 0.042$  และ  $1.451 \pm 0.053$  เรียงตามลำดับตามรูปแบบโครงสร้าง) และจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา ( $1.412 \pm 0.016$ ,  $1.437 \pm 0.057$  และ  $1.449 \pm 0.044$  เรียงตามลำดับตามรูปแบบโครงสร้าง) โดยโครงสร้างไม้แร็กเกต RR และ RO มีแนวโน้มของค่าอัตราส่วนนี้ค่อยๆ ลดลงต่อเนื่อง ซึ่งมีแนวโน้มแตกต่างจากไม้แร็กเกต RT ที่มีค่าค่อนข้างคงที่ในจุดกระทบที่ 4 แล้วจึงลดลงในตำแหน่งจุดกระทบ 5 ยังพบอีกว่า ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต ณ จุดกระทบที่ 1 (0, 60) มีค่าน้อยที่สุดทั้งสามโครงสร้าง และมีค่าใกล้เคียงกันมากคือ  $1.406 \pm 0.015$ ,  $1.416 \pm 0.019$  และ  $1.404 \pm 0.029$  เรียงตามลำดับรูปแบบโครงสร้าง ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกตภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง พบว่า ค่าอัตราส่วน ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างคือ RR-สี่เหลี่ยม, RT-สามเหลี่ยม และ RO-วงรี เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือทั้งสามรูปแบบโครงสร้างมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  รวมถึงค่าอัตราส่วนเฉลี่ยจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลาง 60 มม. และจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ดังตารางที่ 5 อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญค่าอัตราส่วนเฉลี่ยระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งเช่นเดิม แสดงว่าโครงสร้างไม้แร็กเกตไม่นำมาความสัมพันธ์กับตำแหน่งจุดกระทบเช่นกัน โดยค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต (Smash ratio) ของรูปแบบโครงสร้างรวม (3R) ณ จุดกระทบ ที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. ยังคงมีค่ามากที่สุด และมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 1.811 เช่นกัน ทั้งนี้จุดกระทบที่เหลือยังคงมีแนวโน้มน้อยกว่าจุดกระทบกลางหน้าไม้แร็กเกต โดยจุดกระทบที่ 4 มีค่าลดลง ร้อยละ 0.208 และจุดกระทบที่ 5 มีค่าลดลง ร้อยละ 0.487 และจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าน้อยที่สุด และมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.880 ดังตารางที่ 2

### 5) อภิปรายผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ใน 3 รูปแบบโครงสร้าง

จากการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกตจากสามรูปแบบโครงสร้างตามตัวอย่างในแต่ละผลิตภัณฑ์ ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูงความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 450 rpm ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกตสามรูปแบบโครงสร้าง เท่ากับ  $49.98 \pm 0.003$  เรเดียนต่อวินาที ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) หรือ ค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ณ จุดกระทบที่ 3 (GSC) ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง เมื่อเปรียบเทียบกันมีค่าใกล้เคียงกันมากมีค่าอยู่ระหว่าง 30.816-30.884 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการทดลอง และการควบคุมตัวแปรต่างๆได้ค่อนข้างดีในการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ โดยไม้แร็กเกตทั้งสามโครงสร้าง มีความยาวเท่ากัน ทำจากวัสดุชนิด Graphite เหมือนกัน แตกต่างกันที่รูปแบบโครงสร้างและวัสดุ ส่วนประกอบเพิ่มเติม ในตารางที่ 3 สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของโจวและคณะ (Chow et al., 2003) เกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกแรก ซึ่งพบว่า ความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยว และในประเภทหญิงเดี่ยวเท่ากับ  $38.57 \text{ ms}^{-1}$  และ  $30.81 \text{ ms}^{-1}$  เรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง จึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งของสามโครงสร้าง

ทั้งนี้ ในการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังจากกระทบเอ็นบนหน้าไม้ในสามรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์คือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าตัวแปรต่างๆ จากทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสด้วยเครื่องทดสอบจากสามรูปแบบโครงสร้าง พบว่า ลูกเทนนิสที่ปล่อยลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิสคล้ายกับการเสิร์ฟจริง โดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO ก่อนกระทบทั้ง 5 ตำแหน่งมีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับตำแหน่งจุดกระทบ สอดคล้องกับรายงานการวิจัยในการเสิร์ฟลูกแรกของโจวและคณะ (Chow et al., 2003) ในการแข่งขันกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า พบว่า ความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบในประเภทชายเดี่ยวและในประเภทหญิงเดี่ยวเท่ากับ  $3.86 \text{ ms}^{-1}$  และ  $4.12 \text{ ms}^{-1}$  เรียงตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง พบว่าค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบทั้ง 4 ตำแหน่งจุดกระทบในแนวแกนตั้ง (ดังรูปที่ 12) ของรูปแบบโครงสร้างทั้งสาม มีความแตกต่างอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพและขีดความสามารถของเครื่องมือที่มีความละเอียดเพียงพอ (sensitivity analysis) และกระบวนการวิจัยที่แยกแยะความแตกต่างของระยะห่างของแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ 30 มิลลิเมตร ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต (และ 4 ตำแหน่งจุดกระทบในแนวแกนตั้ง) แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสาม ดังตารางที่ 4

อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (30, 0) ของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO เท่ากับ  $44.436 \pm 0.226$ ,  $45.401 \pm 0.769$  และ  $45.491 \pm 0.705$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบสอดทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง มีความสอดคล้องกับโชว์และคณะ (Chow et al., 2003) ที่รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองจากนักเทนนิสประเภทเดี่ยวในกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า ปี ค.ศ. 1996 พบว่าการเสิร์ฟลูกแรกนั้นมีความเร็วของลูกเสิร์ฟมากกว่าการเสิร์ฟลูกที่สองถึง 24.1 % โดยในประเภทชายเดี่ยว (ค่าเฉลี่ยความเร็วของลูกเสิร์ฟลูกแรกต่อลูกที่สอง เท่ากับ  $50.33$  vs.  $37.80$   $\text{ms}^{-1}$ ,  $p < 0.01$ ) และในประเภทหญิงเดี่ยว (เท่ากับ  $42.06$  vs.  $32.70$   $\text{ms}^{-1}$ ,  $p < 0.01$ ) โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสรองลงมาจากจุดกระทบที่ 2 คือ จุดกระทบที่ 3 (GSC) ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างเหมือนกัน ซึ่งมีค่าเรียงลำดับตามโครงสร้างคือ  $43.701 \pm 0.194$ ,  $44.480 \pm 0.803$  และ  $44.439 \pm 0.632$  เมตรต่อวินาที พบอีกว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจุดกระทบที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามรูปแบบโครงสร้างคือ  $43.482 \pm 0.245$ ,  $43.856 \pm 0.353$  และ  $43.812 \pm 0.930$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับตามโครงสร้างทั้งสาม อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง พบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. มีมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือในสามรูปแบบโครงสร้าง รวมถึงค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลาง 60 มม. มีค่าต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เช่นกัน ดังตารางที่ 3 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสาม พบว่ารูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต RO (วงรี) และ RT (สามเหลี่ยม) มีค่ามากกว่า RR (สี่เหลี่ยม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  แต่ไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งเช่นเดิม

สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ของจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) ของไม้แร็กเกตโครงสร้าง RR, RT และ RO มีค่าสูงที่สุดเช่นกัน เท่ากับ  $1.444 \pm 0.012$ ,  $1.475 \pm 0.036$  และ  $1.472 \pm 0.030$  เรียงตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049, 1.872 และ 1.377 เรียงตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเฉลี่ยความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกตภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้ง 5 พบว่า ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกต (Smash ratio) ของสามรูปแบบโครงสร้างคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือในสามรูปแบบโครงสร้าง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ดังตารางที่ 5 แสดงว่าค่าอัตราส่วนแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ น่าจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการการเสิร์ฟลูกแรก อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าอัตราส่วนนี้ระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ แสดงว่ารูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) ไม่น่าจะมีผลต่อค่าอัตราส่วนดังกล่าว ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบระหว่างสามโครงสร้างไม้แร็กเกต (RO และ RT มีค่ามากกว่า RR,  $p < 0.05$ ) หมายถึงรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสาม น่าจะไม่มี ความแตกต่างกันต่อผลประสิทธิภาพในการการเสิร์ฟลูกแรก รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่ง เช่นเดียวกับค่าตัวแปรอื่นๆ แสดงว่าโครงสร้างไม้แร็กเกต ไม่น่าจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับตำแหน่งจุดกระทบที่กำหนดไว้



## 6) สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ใน 3 รูปแบบโครงสร้าง

จากการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกตจากสามรูปแบบโครงสร้างตามตัวอย่างในแต่ละผลิตภัณฑ์ ด้วยการจำลองการเสิร์ฟฟลูกแพลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูงความเร็วรอบของมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกตเท่ากับ  $49.98 \pm 0.003$  เรเดียนต่อวินาที ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) หรือ มีค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ณ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง ใกล้เคียงกันมากมีค่าอยู่ระหว่าง 30.816 - 30.884 เมตรต่อวินาที และใกล้เคียงกับค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในการแข่งขันระดับนานาชาติจริง ดังนั้นจึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่ง รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งของสามโครงสร้าง ทั้งนี้ลูกเทนนิสที่ถูกปล่อยลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิสคล้ายกับการเสิร์ฟจริงโดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact ball velocity) ของไม้แร็กเกตมีค่าระหว่าง 2.244 ถึง 3.678 เมตรต่อวินาที มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับตำแหน่งจุดกระทบ และใกล้เคียงกับค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบในการแข่งขันระดับนานาชาติเช่นกัน โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตในสามรูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่ง พบว่า ค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบของรูปแบบโครงสร้างทั้งสามมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ ยกเว้นตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับตำแหน่งจุดกระทบที่ 5 ที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เอียงออกไปทางขวา อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามด้วย

ทั้งนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact ball velocity) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (30, 0) ของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO เท่ากับ  $44.436 \pm 0.226$ ,  $45.401 \pm 0.769$  และ  $45.491 \pm 0.705$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับมีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในสามรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่ง พบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือในสามรูปแบบโครงสร้าง และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบระหว่าง

โครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสาม พบว่า รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต RO (วงรี) และ RT (สามเหลี่ยม) มีค่ามากกว่า RR (สี่เหลี่ยม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$

สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ของจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) ของไม้แร็กเกตโครงสร้าง RR, RT และ RO มีค่าสูงที่สุดเช่นกัน เท่ากับ  $1.444 \pm 0.012$ ,  $1.475 \pm 0.036$  และ  $1.472 \pm 0.030$  เรียงตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049, 1.872 และ 1.377 เรียงตามลำดับ โดยค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกตของรูปแบบโครงสร้างรวม (3R) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่ามากที่สุดและมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 1.811 เช่นเดียวกัน และจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.880 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าอัตราส่วนเฉลี่ยในสามรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้า พบว่าค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกต (Smash ratio) ของสามรูปแบบโครงสร้างคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างจากตำแหน่งจุดกระทบที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  แสดงว่าค่าอัตราส่วนแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ น่าจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการการเสิร์ฟลูกแรก อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าอัตราส่วนนี้ระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ หมายถึงรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) ไม่น่าจะมีผลความแตกต่างกันในด้านประสิทธิภาพการเสิร์ฟลูกแรก รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนระหว่างสามรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต และจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งเช่นเดียวกับค่าตัวแปรอื่นๆ แสดงว่าโครงสร้างไม้แร็กเกต ไม่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งจุดกระทบที่กำหนดไว้เช่นกัน

ดังนั้นในการศึกษาต่อเนื่องในขั้นตอนที่ 2 เพื่อสร้างโมเดลหรือสมการถดถอยทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก น่าจะดำเนินการเก็บข้อมูลทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง เพื่อได้ค่าตัวแปรอิสระต่างๆที่เป็นตัวแทนมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น (มากกว่าการใช้ค่าอัตราส่วนเฉลี่ยรวมของสามไม้แร็กเกต: 3R) แล้วนำข้อมูลมาสร้างสมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบต่างๆบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ในรูปแบบโครงสร้างรวม (3R) ซึ่งน่าจะใช้เป็นตัวแทนของทั้งสามรูปแบบโครงสร้างต่อไป โดยใช้ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกตนี้ (Smash ratio) เป็นตัวแปรอิสระที่สำคัญตัวหนึ่งในการสร้างสมการถดถอย

## ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2

### 1) ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 2 การสร้างโมเดลสมการถดถอย เพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก

การวิจัยในขั้นตอนนี้ เป็นการศึกษาโมเดลสมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ จากกลุ่มตัวอย่างนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ สังกัดลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทย จำนวน 6 คน โดยใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นตอนที่ 1 มาประกอบรวมในสมการ เพื่อสร้างโมเดล/สมการถดถอยเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ (predictive impact model) ตามกรอบแนวความคิดการวิจัยในบทที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาโมเดลที่ได้จากสถานะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) แม้ว่าจะควบคุมตัวแปรได้ค่อนข้างยาก แต่ก็สามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์และอธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยตรง อย่างไรก็ตามไม่ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวกับด้านทักษะเทคนิคในการส่งแรงจากตัวนักกีฬา มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ (Smash ratio;  $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) ไม้แร็กเกต RR ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่าสูงที่สุด ( $1.444 \pm 0.012$ ) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ และมีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049 ซึ่งน่าจะเป็นจุดกระทบที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ ขณะความเร็วของหน้าไม้แร็กเกตก่อนกระทบลูกเทนนิสเฉลี่ย 30.84 เมตรต่อวินาที หรือมีความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกต เท่ากับ 49.98 เรเดียนต่อวินาที

ผลการวิจัยใน 3 รูปแบบโครงสร้างคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) พบค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ (Smash ratio) ของจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) ของไม้แร็กเกตโครงสร้างทั้งสาม (3R) มีค่ามากที่สุด และมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 1.811 เช่นกัน พบว่า ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกตของสามรูปแบบโครงสร้าง ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างจากตำแหน่งจุดกระทบที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  แสดงว่าค่าอัตราส่วนแต่ละตำแหน่งจุดกระทบน่าจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าอัตราส่วนนี้ ระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ แสดงถึงโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบไม่น่าจะมีความแตกต่างกันต่อผลประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรก

**ตารางที่ 6** แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ 3 รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต (สี่เหลี่ยม; RR , สามเหลี่ยม; RT และวงรี; RO) จากนักเทนนิสเยาวชนทีมชาติทั้ง 3 กลุ่ม ที่เข้าร่วมการวิจัยรวม 6 คน โดยนักกีฬาแต่ละบุคคลใช้ไม้แร็กเกตของตนเอง (ไม้แร็กเกตยี่ห้อเดียวกับไม้แร็กเกตเดิมที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1 ดังตารางที่ 3 รวม 2 อัน) แหล่งข้อมูลมาตรฐานเทียบตาม RDC Unit (Babolat Racket Diagnostic Center)

Model	Body Wieght Height (kg) (cm)	Composition	Length (cm.)	Head size (sq. in.)	Swing weight (kg.cm <sup>2</sup> )	Stiffness (Hz)	Strung tension (lbs)
<b>RR-Rectangular Racket</b>							
- Subject-RR1	85 183	Graphite X-Fullerene	68.58	95	317	63	49
- Subject-RR2	78 178	Graphite Vcore	68.58	100	305	67	54
<b>RT-Triangle Racket</b>							
- Subject-RT1	66 175	Graphite Ex03tour	68.58	100	315	50	52
- Subject-RT2	72 178	Graphite Ex03tour100	68.58	100	323	52	50
<b>RO-Oval Racket</b>							
- Subject-RO1	72 179	Graphite Puredrive	68.58	100	315	66	46
- Subject-RO2	67 176	Graphite Tungsten	68.58	98	327	63	53

ในขั้นตอนที่สอง ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ (5 ตัวแปรอิสระสำคัญที่ใช้ในการวิจัย และ 1 ตัวแปรตาม) จากการเก็บข้อมูลและบันทึกภาพกล้องวิดีโอความเร็วสูง 2,000 เฮิรตซ์ จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้วิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกพลีทจากนักกีฬาเยาวชนทีมชาติ โดยนักกีฬาแต่ละกลุ่มใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตที่เป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบโครงสร้างคือ สี่เหลี่ยม (RR), สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) รวม 3 กลุ่ม ในแต่ละกลุ่มใช้ไม้แร็กเกตที่มีรูปแบบโครงสร้างและยี่ห้อเดียวกันในการทดลอง รวม 2 ไม้แร็กเกตต่อบุคคล (ไม้แร็กเกตของตนเอง และไม้แร็กเกตเดิมที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1) โดยมีคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตในแต่ละโครงสร้างที่แตกต่างกันไป และนำมาขึ้นเอ็นชนิดเดียวกันยี่ห้อ Babolat-Pro Hurricane เช่นเดิม โดยมีความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตตามที่ตนเองเคยใช้ในรายการแข่งขันต่างๆ ระหว่าง 50-60 ปอนด์ มีรายละเอียดดังตารางที่ 6 ดำเนินการเก็บข้อมูลและบันทึกภาพวิดีโอลูกตีที่ลงในพื้นที่ที่กำหนด ซึ่งในนักกีฬาแต่ละบุคคลน่าจะสามารถเก็บบันทึกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีและตรงตามตำแหน่งที่ต้องการประมาณ 25 ข้อมูลต่อไม้แร็กเกต จากการเสิร์ฟลูกแรก จำนวน 60 ครั้ง (เฉลี่ยความสำเร็จในการเสิร์ฟร้อยละ 40-55) ซึ่งคาดว่าจะได้ข้อมูลรวม 50 ข้อมูลต่อนักกีฬา (25 ข้อมูลต่อไม้แร็กเกต x 2 ไม้แร็กเกต) และได้ข้อมูลกลุ่มละประมาณ 100 ข้อมูล (50 ข้อมูลต่อคน x 2 คน) อย่างไรก็ตามสามารถคัดเลือกข้อมูลจากการบันทึกภาพวิดีโอลูกตีในนักกีฬากลุ่มแรกคือ รูปแบบ

โครงสร้างสี่เหลี่ยม (Subject-RR) จำนวน 82 ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 7 (a) และสามารถคัดเลือกข้อมูลจากการบันทึกภาพวิดีโอลูกตีในนักกีฬาทั้งสามกลุ่ม รวม 253 ผลการทดสอบ ประมาณสองในสามจากข้อมูลที่ได้คาดไว้ 300 ข้อมูล (นักกีฬารวม 6 คน) เนื่องจากภาพบันทึกวิดีโอลูกเสิร์ฟดังกล่าวไม่ชัดเจนเท่าที่ควรจึงถูกคัดออก หรือตำแหน่งจุดกระทบหลุดออกจากตำแหน่งที่กำหนดไว้พบว่า ประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติในกลุ่ม Subject-RR หลังเก็บข้อมูลและวิเคราะห์เลือกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดี จำนวน 82 ข้อมูลนั้น สามารถเสิร์ฟตรงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30: a half ball distance above) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 56.4 อันดับที่สองรองลงมาได้แก่จุดกระทบบนตำแหน่งเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 3 ที่กลางหน้าไม้แรกเกต (0, 0: GSC) คิดเป็นร้อยละ 22.6 รองลงมาอีกเป็นจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60: a ball distance above) คิดเป็นร้อยละ 14.4 โดยจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา 30 มม. (30, 0: a half ball distance shift to right) คิดเป็นร้อยละ 5.2 และตำแหน่งจุดกระทบ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, -30: a half ball distance below) น้อยที่สุดเพียงร้อยละ 1.6

ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติในกลุ่ม Subject-RT รูปแบบโครงสร้างสามเหลี่ยม เก็บข้อมูลและวิเคราะห์เลือกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดี จำนวน 90 ข้อมูล สามารถเสิร์ฟตรงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 58.4 เช่นกัน แต่ในอันดับที่สองรองลงมาได้แก่จุดกระทบบนตำแหน่งเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. คิดเป็นร้อยละ 20.5 รองลงมาอีกเป็นจุดกระทบที่ 3 ที่กลางหน้าไม้แรกเกต (0, 0: GSC) คิดเป็นร้อยละ 16.1 โดยจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา 30 มม. คิดเป็นร้อยละ 3.9 และตำแหน่งจุดกระทบ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. น้อยที่สุดเช่นเดิมเพียงร้อยละ 1.1 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติในกลุ่ม Subject-RO เก็บข้อมูลและวิเคราะห์เลือกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดี จำนวน 81 ข้อมูล สามารถเสิร์ฟตรงตำแหน่งหน้าไม้ 30 มม. มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 62.8 เช่นกัน แต่ในอันดับที่สองรองลงมาได้แก่จุดกระทบบนตำแหน่งเอ็นหน้าไม้เทนนิส จุดกระทบที่ 3 ที่กลางหน้าไม้แรกเกต (0, 0: GSC) คิดเป็นร้อยละ 25.1 รองลงมาอีกเป็นจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. คิดเป็นร้อยละ 10.6 โดยจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา 30 มม. คิดเป็นร้อยละ 1.1 และตำแหน่งจุดกระทบ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. น้อยที่สุดเช่นเดิมเพียงร้อยละ 0.4

**ตารางที่ 7** แสดงผลการวิเคราะห์ภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีในทดสอบการเสิร์ฟลูกเทนนิสจากนักเทนนิสเยาวชนทีมชาติรวม 3 กลุ่ม ที่เสิร์ฟตรงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตในแต่ละจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง (mean) โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกต 3 รูปแบบโครงสร้าง (สี่เหลี่ยม; RR , สามเหลี่ยม; RT และวงรี; RO) จำนวน 167 ผลการวิเคราะห์สามมิติ (b) จาก 253 ผลการทดสอบ (a) โดยนักกีฬาแต่ละบุคคลใช้ไม้แร็กเกตยี่ห้อเดียวกัน 2 อัน (ของนักกีฬาเองและไม้แร็กเกตเดิมที่ใช้ทดลองในขั้นตอนแรก)

(a) ข้อมูลจากการบันทึกภาพวิดีโอลูกดี จำนวน 253 ผลการทดสอบ

Parameters	Percent of ball Impact Location in Success Serve by Players				
	P1: (0, 60) (one-ball above)	P2: (0, 30) (half-ball above)	P3: (0, 0) (GSC- center)	P4: (0, -30) (half-ball below)	P5: (-30, 0) (off- center)
<b>RR-Rectangular Racket</b> (n=82)					
- Subject-RR1	16.4	55.6	19.4	2.4	6.4
- Subject-RR2	12.3	57.3	25.8	0.8	3.9
Total	14.4	56.4	22.6	1.6	5.2
<b>RT-Triangle Racket</b> (n=90)					
- Subject-RT1	24.6	60.2	15.4	0.8	4.0
- Subject-RT2	16.3	56.7	16.8	1.5	3.8
Total	20.5	58.4	16.1	1.1	3.9
<b>RO-Oval Racket</b> (n=81)					
- Subject-RO1	11.8	60.8	25.4	0.8	1.4
- Subject-RO2	9.4	64.9	24.8	0.1	0.8
Total	10.6	62.8	25.1	0.4	1.1
Total (n = 253)	14.2	60.2	21.3	1.0	3.3

(b) ผลการวิเคราะห์ภาพแบบ 3 มิติ จำนวน 167 ผลการวิเคราะห์ (จากผลการทดสอบ)

Parameters	Percent of ball Impact Location in Success Serve by Players				
	P1: (0, 60) (one-ball above)	P2: (0, 30) (half-ball above)	P3: (0, 0) (GSC- center)	P4: (0, -30) (half-ball below)	P5: (-30, 0) (off- center)
<b>RR-Rectangular Racket</b> (n <sup>#</sup> =65)					
- Subject-RR1 (34)	17.6	52.9	20.5	0	8.8
- Subject-RR2 (31)	12.9	54.8	25.8	3.2	3.2
Total	15.2	53.9	23.1	1.6	6.0
<b>RT-Triangle Racket</b> (n <sup>#</sup> =53)					
- Subject-RT1 (23)	17.4	60.9	13.0	4.3	4.3
- Subject-RT2 (20)	20.0	55.0	15.0	0	10.0
Total	18.7	57.6	14.0	2.1	7.1
<b>RO-Oval Racket</b> (n <sup>#</sup> =49)					
- Subject-RO1 (28)	10.7	60.7	25.0	0	3.5
- Subject-RO2 (21)	4.7	66.6	23.8	0	4.7
Total	7.7	63.6	24.4	0	4.1
Total (n <sup>#</sup> = 167)	13.8	58.4	20.5	1.2	5.7

ดังนั้นประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติในทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง นักเทนนิสสามารถเสิร์ฟตรงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30: a half ball distance above) มากที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 60.2 อันดับที่สองรองลงมาได้แก่จุดกระทบบนตำแหน่งเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 3 ที่กลางหน้าไม้แรกเกิด (0, 0: GSC) เฉลี่ยร้อยละ 21.3 และรองลงมาอีกเป็นจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60: a ball distance above) เฉลี่ยร้อยละ 14.2 โดยจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 5 ี้ออกจากจุดกลางไปทางขวา 30 มม. (30, 0: a half ball distance shift to right) และตำแหน่งจุดกระทบ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, -30: a half ball distance below) น้อยที่สุด เฉลี่ยเพียงร้อยละ 3.3 และร้อยละ 1.0 เรียงตามลำดับ ดังตารางที่ 7(a)

หลังจากนั้น นำข้อมูลที่สามารถคัดเลือกข้อมูลจากการบันทึกภาพวิดีโอลูกตีในนักกีฬา ทั้งสามกลุ่ม ทั้งหมด 253 ผลการทดสอบในการเสิร์ฟ มาคัดเลือกข้อมูลในการเสิร์ฟที่ดีตรงตาม ตำแหน่งจุดกระทบ (5 impact positions) ที่ต้องการ ตำแหน่งจุดกระทบละ 5 จากผลการทดสอบในการเสิร์ฟของนักกีฬาแต่ละบุคคล ซึ่งได้ข้อมูลน้อยลงตามความถนัดและความสามารถของนักกีฬาแต่ละบุคคล เพื่อนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ พบว่าสามารถคัดเลือกข้อมูลจากการบันทึกภาพวิดีโอลูกตีและตรงตามตำแหน่งจุดกระทบๆละไม่เกินห้าผลการทดสอบ ในนักกีฬากลุ่มแรกคือ รูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม (Subject-RR) จำนวน 65 ผลการวิเคราะห์ ( $n^{\#}$ ) ดังตารางที่ 7(b) พบอีกว่าผลการวิเคราะห์ภาพแบบ 3 มิติ ของตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ในทั้งสามกลุ่มมีค่าเฉลี่ยร้อยละใกล้เคียงกับผลการทดสอบข้างต้น ดังตารางที่ 7(a) แตกต่างกันที่ตรงค่าเฉลี่ยร้อยละของตำแหน่งจุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 ลดลงบ้าง เนื่องจากมีผลการทดสอบในแต่ละจุดกระทบเกินห้าผลการทดสอบจึงถูกตัดออก ดังนั้นสามารถคัดเลือกข้อมูลจากการบันทึกภาพวิดีโอลูกตีในนักกีฬาทั้งสามกลุ่ม (นักกีฬารวม 6 คน) รวม 167 ผลการวิเคราะห์ภาพแบบ 3 มิติ (ตำแหน่งจุดกระทบส่วนใหญ่คือ จุดกระทบ 1, 2 และ 3 ดังตารางที่ 7(b) ซึ่งเป็นไปตามที่ได้คาดคะเนไว้ (ต้องการข้อมูลอย่างน้อย 150 ข้อมูล ถึง 300 ข้อมูล) นำมาสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนาย ตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแพลท์จากนักกีฬาเยาวชนทีมชาติ และใช้ตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (Smash ratio:  $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นตอนที่ 1 มาประกอบรวม

ในรูปที่ 19 แสดงความเร็วของลูกเทนนิสสูงสุด (maximum velocity of ball; กราฟด้านซ้าย) และรูปกราฟอัตราเร่งของลูกเทนนิส (acceleration of ball; กราฟด้านขวา) หลังกระทบเอ็นบนหน้าไม้แรกเกิด RR ณ ตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (GSC) ด้วยชุดวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ โดยรูปภาพด้านซ้ายจากกล้องความเร็วสูงตัวที่ 1 และ ด้านขวาจากกล้องตัวที่ 2 (อยู่ด้านหลังนักกีฬา และมุมกล้องเป็นมุมยก) ทั้งนี้แสดงกราฟความเร็วของลูกเทนนิสจากการวิเคราะห์ในภาพที่ 4 ขณะเข้ากระทบเต็มลูก (4<sup>th</sup> frame of ball inbound: No-333) พบว่าความเร็วของลูกเทนนิสน้อยมากเกือบหยุดนิ่ง (a, เส้นกราฟตัดกับเส้นตรงในแนวแกนตั้ง) ในขณะที่เสิร์ฟลูกแรกของนักกีฬา (Subject-RR1, Ht = 183 cm., Wt = 85 kg ในตารางที่ 6) เท่ากับ 4.043 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) ต่อจากนั้นลูกเทนนิสเริ่มเคลื่อนที่ออกจากเอ็นบนหน้าไม้แรกเกิด และมีความเร็วของลูกเทนนิสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (b, กราฟตัดกับเส้นตรงแกนตั้ง) มีค่าเท่ากับ 50.043 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) หลังจากทีค่าอัตราเร่งของลูกเทนนิสเริ่มลดลงเหลือ  $183.1 \times 10^2$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ( $\text{ms}^{-2}$ ) และใช้เวลาเข้ากระทบใกล้เคียงกันมากประมาณ 4 มิลลิวินาที (millisecond) คล้ายกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 จากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามพบว่าความเร็ว



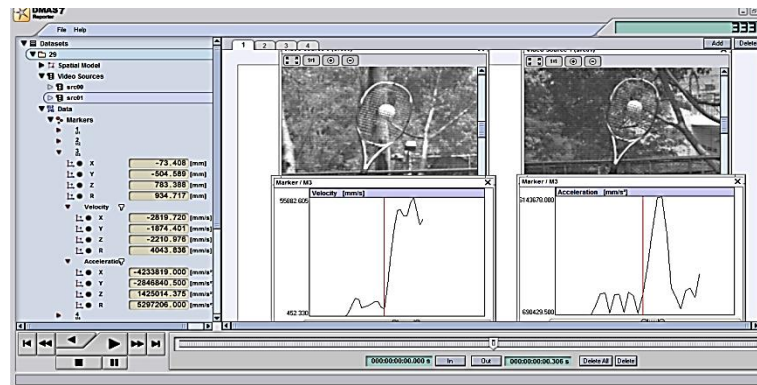
ของลูกเทนนิสมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่งและมีค่าสูงสุด ( $c$ , กราฟตัดกับเส้นตรงแกนตั้ง) ในขณะที่ลูกเคลื่อนที่ออกจากเอ็นบนหน้าไม้แล้วสีภาพ (No-342) มีค่าเท่ากับ 55.882 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) หรือ 201.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กม/ชม: km/hr) ในขณะที่ความเร็วหน้าไม้แรกเกิดก่อนการเข้ากระทบของนักกีฬาคนนี้มีค่าเท่ากับ 40.060 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) หรือประมาณ 144.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/hr) ซึ่งเป็นนักกีฬาที่มีการเสิร์ฟลูกแรกได้เร็วและรุนแรง อย่างไรก็ตามความสามารถในการเสิร์ฟลูกแรกจะลดลงในขณะแข่งขันจริง เมื่อเปรียบเทียบกับกรีกซ้อม ทำให้ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดและลูกเทนนิสลดลง เนื่องจากมีความกังวลเข้ามาร่วม รวมถึงต้องคำนึงถึงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพความสำเร็จในการเสิร์ฟด้วย ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากขณะที่หน้าไม้แรกเกิดเข้ากระทบลูกเทนนิส มีการให้ตัวของข้อมือ (flexibility) จากนักกีฬา แล้วจึงมีการส่งแรงต่อเนื่องจากข้อมือที่มีทักษะการเสิร์ฟที่ดี หรือมีการสับข้อมือของนักกีฬา หลังจากที่ย่อตราเร่งส่งต่อไปยังลูกเทนนิสและมีการลดลงเกือบทั้งหมด ทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการเสิร์ฟลูกพลีทโดยตรงจากเครื่องทดสอบ (แตกต่างกันที่ขณะที่เข้ากระทบ ไม้แรกเกิดที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ อีสระจากแรงขับเคลื่อนของมอเตอร์)

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อนแบบการคัดเลือกลำดับขั้น (Multiple Regression; Stepwise) จะใช้ตัวแปรอิสระสำคัญที่ใช้ในการวิจัย 5 ตัวแปร ตามกรอบแนวความคิดการวิจัยในบทที่ 2 ได้แก่

1. ความเร็วไม้แรกเกิดก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket;  $X_1$ )
  2. ความตึงเอ็นบนหน้าไม้แรกเกิด (String tension;  $X_2$ )
  3. น้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แรกเกิด (Swing weight of racket;  $X_3$ )
  4. ค่าความแข็งแรงแรงของไม้แรกเกิด (Stiffness of racket;  $X_4$ )
  5. ค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วไม้แรกเกิดก่อนกระทบ (Smash ratio:  $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ;  $X_5$ ) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- ในขั้นตอนที่ 1

เพื่อใช้ในการทำนายความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball;  $Y$ ) ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิดในการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกพลีทดังสมการถดถอยที่น่าจะเป็นแสดงไว้ ดังนี้

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5$$



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 19 แสดงรูปภาพอัตราเร่งและความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด (acceleration and maximum velocity of ball) หลังกระทบหน้าไม้แรกเกิด RR ณ ณ จุดกระทบตำแหน่งที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (GSC) จากการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ (รูปภาพด้านซ้ายจากกล้องตัวที่ 1 และด้านขวาจากกล้องตัวที่ 2) โดย (a) กราฟแสดงความเร็วลูกเทนนิสในภาพที่ 4 (ด้านซ้าย) ขณะหน้าไม้แรกเกิดเข้ากระทบเต็มลูก (4<sup>th</sup> frame of ball inbound: No-333), (b) กราฟแสดงความเร็วลูกเทนนิสในภาพที่ 9 (No-338) การเริ่มเคลื่อนที่ของลูกออกจากเอ็นบนหน้าไม้จังหวะแรก และ (c) กราฟแสดงความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดในขณะที่ลูกเคลื่อนที่ออกจากเอ็นบนหน้าไม้แล้วสีภาพ (No-342) จากการเสิร์ฟลูกแรกของนักกีฬาเยาวชนทีมชาติในสนามเทนนิส

ผลการการวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรอิสระที่ทำนายตัวแปรตาม แบบการคัดเลือกลำดับขั้น (Multiple Regression; Stepwise) จากวิเคราะห์ภาพวิดีโอแบบ 3 มิติ จากลูกเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งจุดกระทบๆละ 5 ผลการวิเคราะห์ภาพวิดีโอจากนักกีฬาแต่ละบุคคล รวมทั้งสิ้น 167 ผลการวิเคราะห์ภาพ แบบ 3 มิติ ( $n^{\#}$ ) เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยในการทำนายความเร็วของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย ของตัวแปรอิสระห้าตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม ด้วยวิธีทดสอบค่าเอฟ (F-test) เท่ากับ 668.019 และพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ดังตารางที่ 8 แสดงว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสำคัญอย่างมีนัยทางสถิติ

**ตารางที่ 8** แสดงผลการการวิเคราะห์ค่าความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรอิสระทั้งห้าตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม รวมถึงการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรอิสระรวม ( $n^{\#} = 167$ ) ด้วยวิธีทดสอบค่าเอฟ (F-test)

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p-value
- Regression	2889.639	4	722.410	668.019	$p < 0.05$
- Residual	59.478	162	1.081		
- Total	2949.117	166			

โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนดิบ ( $B$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ( $SE$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนมาตรฐาน ( $\beta$ ) รวมถึงทดสอบค่า  $t$  ของตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม ดังตารางที่ 9 พบว่า โมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกนี้ ค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball: Ball Velocity<sub>post</sub>) ที่เพิ่มขึ้น เป็นเกิดจากตัวแปรอิสระแรกคือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre- impact velocity of Racket: Racket Velocity<sub>pre</sub>) ซึ่งเป็นตัวทำนายทางบวกต่อค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ มีอิทธิพล หรือผลมากที่สุด .762 (standardized coefficient; bata ( $\beta$ ) = .762) หมายความว่า ถ้าค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ในขณะที่ค่าตัวแปรอิสระที่เหลือทุกตัวมีค่าคงที่ จะมีผลทำให้ค่าความเร็วสูงสุดของลูก

เทนนิสหลังกระทบเพิ่มขึ้น .762 หน่วย หรือร้อยละ 76.2 ดังสมการถดถอยในการทำนายความเร็ว ลูกเสิร์ฟลูกแรกในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส )predictive impact model) แสดงไว้ในสมการทำนายในรูปแบบค่าคะแนนดิบ และค่าคะแนนมาตรฐาน ดังนี้

- สมการทำนายในรูปแบบค่าคะแนนดิบ

$$Y = -25.978 + .970 (X1) + 86.223 (X5) + .270 (X4) - .840 (X2)$$

- สมการทำนายในรูปแบบค่ามาตรฐาน

$$Z_Y = .762 Z_{X1} + .671 Z_{X5} + .564 Z_{X4} - .329 Z_{X2}$$

ทั้งนี้ มีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบค่าคะแนนดิบ ( $B$ ) ของความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ เท่ากับ .970 (unstandardized coefficient =.970) แสดงว่า ถ้าค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ 100.0 กม/ชม. (km/hr) จะมีผลมาจากค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ เท่ากับ 97.0 กม/ชม. ที่เหลือจะเกิดจากตัวแปรอิสระอื่นๆอีกสามตัวแปรอิสระ พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  และมีค่าคงที่เริ่มต้น เท่ากับ -25.978 (constant = -25.978) หมายถึงในสมการสหสัมพันธ์เชิงซ้อนนี้มีจุดตัดเส้นแนวแกนตั้ง ( $Y$ ) ที่ -25.978 หน่วย ดังสมการทำนายในรูปแบบค่าคะแนนดิบ

**ตารางที่ 9** แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนดิบ ( $B$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ( $SE$ ), ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนมาตรฐาน ( $\beta$ ) และค่า  $t$  ของตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม จากโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก ( $n = 167$ )

Model	Unstandardized Coefficients ( $B$ )	Std. Error ( $SE$ )	Standardized Coefficients ( $\beta$ )	t	p-value
- (constant)	-25.978	2.388	.762	-2.503	$p < 0.05$
- Racket Velocity <sub>pre</sub>	.970	.033	.671	135.025	$p < 0.05$
- Smash ratio	86.223	.764	.564	112.797	$p < 0.05$
- Racket <sub>stiffness</sub>	.270	.066	-.329	43.552	$p < 0.05$
- String tension	-.840	.034		-24.809	$p < 0.05$

ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพล หรือผลต่อค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรกรองลงมาคือ ค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อไม้แร็กเกต (Smash ratio: Ball<sub>post</sub>/Racket<sub>pre</sub>) ซึ่งทำให้เพิ่มขึ้น .671

( $\beta = .671$ ) หรือร้อยละ 67.1 รองลงอีกคือค่าความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต (Stiffness of racket: Racket stiffness) ทำให้เพิ่มขึ้น .564 ( $\beta = .564$ ) หรือร้อยละ 56.4 ทั้งนี้ค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension) มีอิทธิพล หรือผลตรงกันข้ามทำให้ลดลง .329 ( $\beta = -.329$ ) หรือร้อยละ 32.9 แสดงว่าค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตลดลงในช่วงที่เหมาะสมจะทำให้ความเร็วลูกเทนนิสเพิ่มขึ้น และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ทั้งสามของค่าตัวแปรดังกล่าวข้างต้นเช่นกัน ดังสมการทำนายในรูปแบบค่าคะแนนมาตรฐานที่แสดงไว้ข้างต้น

ส่วนค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (Swing weight of racket) ถูกจัดหรือคัดออกจากสมการสหสัมพันธ์เชิงซ้อนนี้ (Variable removed) จึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า ค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต น่าจะไม่มีผล หรือมีผลน้อยต่อการทำนายความเร็วลูกเสิร์ฟลูกแรกในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส และภายหลังการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การทำนายของตัวแปรอิสระทั้งสี่ตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตามนั้น พบอีกว่าค่ากำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณที่ปรับเทียบ (Adjusted R square; Adj R<sup>2</sup> = .898) คือ สัมประสิทธิ์การทำนายที่ปรับเทียบ มีค่าเท่ากับ .898 ดังตารางที่ 10 โดยค่าสัมประสิทธิ์การทำนายที่ปรับเทียบของตัวแปรอิสระตัวแรก คือความเร็วสูงสุดของไม้แร็กเกตก่อนกระทบ มีค่าเท่ากับ .454 ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การทำนายที่ปรับเทียบของตัวแปรอิสระตัวแรกและตัวที่สอง (อัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อไม้แร็กเกต) มีค่าเท่ากับ .802 และค่าสัมประสิทธิ์การทำนายที่ปรับเทียบของทั้งสามตัวแปรอิสระ (ความเร็วสูงสุดของไม้แร็กเกตก่อนกระทบ, อัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อไม้แร็กเกต และค่าความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต) มีค่าเท่ากับ .877 แสดงว่ามีค่าแปรปรวนของตัวแปรตามที่สามารถทำนายได้ด้วยตัวแปรอิสระตัวแรกคือค่าความเร็วสูงสุดของไม้แร็กเกตก่อนกระทบ เท่ากับ ร้อยละ 45.4 (Adjusted R<sup>2</sup> = .454) ทั้งนี้มีค่าแปรปรวนของตัวแปรตามที่สามารถทำนายได้ด้วยตัวแปรอิสระรวมสี่ตัวแปรอิสระเท่ากับร้อยละ 89.8 (ใน model ที่ 4)

**ตารางที่ 10** แสดงผลการการวิเคราะห์ในรูปแบบของค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (R) ค่ากำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณ (R Square; R<sup>2</sup>) ค่ากำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณที่ปรับเทียบ (Adjusted R<sup>2</sup>) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) ของสัมประสิทธิ์ถดถอยจากโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
4	.988	.976	.898	1.138

ในตารางที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบความเชื่อมั่นของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบค่าคะแนนดิบ (B) สำหรับตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรที่ใช้ทำนายตัวแปรตาม รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlations) และค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เชิงเส้นร่วม (collinearity) จากโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of Racket: Racket Velocity<sub>pre</sub>) ซึ่งเป็นตัวทำนายทางบวกต่อค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ มีอิทธิพลหรือผลมากที่สุด ( $\beta = .762$ ) นั้น มีค่าสูงเช่นกัน เท่ากับ 0.743 โดยมีค่าความเชื่อมั่นของสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบค่าคะแนนดิบ (95.0 % Confidence Interval for B) ของความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ อยู่ระหว่าง .904 ถึง 1.036 อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อไม้แร็กเกต (Smash ratio: Ball<sub>post</sub>/Racket<sub>pre</sub>) ซึ่งทำให้เพิ่มขึ้นลำดับที่สอง ( $\beta = .671$ ) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นร่วมสูง เท่ากับ 0.740 แสดงถึงค่าตัวแปรอิสระทั้งสอง มีความสำคัญอย่างมากที่จะใช้ทำนายตัวแปรตามคือ ค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ

**ตารางที่ 11** แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเชื่อมั่นของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบค่าคะแนนดิบ (B) สำหรับตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรที่ใช้ทำนายตัวแปรตาม รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlations) และค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เชิงเส้นร่วม (collinearity) จากโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก (n<sup>#</sup> =167)

Model	95.0 % Confidence Interval for B		Correlations	Collinearity Statistics
	Lower Bound	Upper Bound		
- (constant)	-21.202	-30.754		
- Racket Velocity <sub>pre</sub>	.904	1.036	.743	.557
- Smash ratio	84.695	87.751	.356	.740
- Racket <sub>stiffness</sub>	.138	.402	.138	.345
- String tension	-.772	-.908	.064	.261

ดังนั้นโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายนี้ สามารถอธิบายและทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกถึง ร้อยละ 89.8 ดังสมการถดถอยในการทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส (predictive impact model) สมการทำนายในรูปแบบค่าคะแนนดิบที่แสดงค่าดังนี้

$$\text{Ball Velocity}_{\text{post}} = -25.978 + .970 (\text{Racket Velocity}_{\text{pre}}) + 86.223 (\text{Smash ratio}) + .270 (\text{Racket}_{\text{stiffness}}) - .840 (\text{String tension})$$

โดย...

- Ball Velocity<sub>post</sub> คือ ค่าการทำนายความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก (km/hr)
- Racket Velocity<sub>pre</sub> คือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนเข้ากระทบลูกเทนนิส (km/hr)
- Smash ratio คือ ค่าอัตราส่วนเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ (ratio)
- Racket<sub>stiffness</sub> คือ ค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกตจากคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของแต่ละผลิตภัณฑ์ (Hz; RDC Unit)
- String tension คือ ค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (lbs)

สมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกนี้ มีอิทธิพลจากปัจจัยตัวแปรอิสระที่เกิดจากองค์ประกอบด้านทักษะเทคนิคในการเสิร์ฟลูกแรกในตัวนักกีฬาเป็นหลักคือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนเข้ากระทบลูกเทนนิส และค่าอัตราส่วนในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ (Smash ratio) โดยมีปัจจัยตัวแปรอิสระที่เกิดจากองค์ประกอบร่วมด้านคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ของไม้แร็กเกตได้แก่ ค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต (Stiffness) และค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension) ส่วนค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (Swing weight) ซึ่งถูกขจัดหรือคัดออกจากสมการถดถอย ไม่น่ามีผล หรือมีผลน้อยมากต่อการทำนายความเร็วลูกเสิร์ฟลูกแรก ดังนั้นจากผลการวิจัยครั้งนี้ เป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ สามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยตรงต่อตัวนักกีฬา ทำให้ทราบถึงปัจจัยเกี่ยวกับที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก หรือพลังสูงสุด โดยเฉพาะตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ เพื่อใช้ในการฝึกซ้อมและการแข่งขันกีฬา และนำมาประยุกต์ใช้ในการเลือกผลิตภัณฑ์ไม้เทนนิส และความตึงเอ็นบนหน้าไม้ที่เหมาะสมสำหรับตนเองในการเสิร์ฟลูกแรก

## 2) สรุปผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 2 การสร้างโมเดลสมการถดถอย เพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก

สรุปผลการวิจัย การศึกษาในขั้นตอนที่สอง เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกจากนักกีฬา สรุปผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอิสระ 5 ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิจัย จากการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ จากการเสิร์ฟลูกแรกในนักกีฬายาวชนทีมชาติ โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตที่เป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ เลือกลูกเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งจุดกระทบๆละไม่เกิน 5 ผลการทดสอบมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ รวมทั้งสิ้น 167 ผลวิเคราะห์ภาพ (n<sup>#</sup>) เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยใช้ในการทำนายความเร็วของลูกเทนนิส ในการเสิร์ฟลูกแรก พบว่า ค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Ball Velocity<sub>post</sub>) ที่เพิ่มขึ้นนั้น เกิดจากตัวแปรอิสระตัวแปรแรกคือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Racket Velocity<sub>pre</sub>) ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่ทำนายทางบวก ต่อค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ มีอิทธิพล หรือผลมากที่สุดถึงร้อยละ 76.2 ( $\beta = .762$ ) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ  $p < 0.05$  โดยตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก รองลงมาคือ อัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อไม้แร็กเกต (Smash ratio) ซึ่งทำให้ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 67.1 ( $\beta = .671$ ) ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพล รองลงอีกคือ ค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต (Racket<sub>stiffness</sub>) ทำให้ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 56.4 ( $\beta = .564$ ) ทั้งนี้ ความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension) มีอิทธิพลหรือผลในทางตรงกันข้าม ทำให้มีค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลดลง ร้อยละ 32.9 ( $\beta = -.329$ ) แสดงว่าค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตลดลงในช่วงที่เหมาะสม ช่วยทำให้ความเร็วลูกเทนนิสเพิ่มขึ้น ยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย สามารถทำนายตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระสี่ตัวแปร ร้อยละ 89.8 (Adjusted R<sup>2</sup> = .898) ดังสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนายความเร็วในการเสิร์ฟลูกแรก [predictive impact model; Ball Velocity<sub>post</sub> = - 25.978 + .970 (Racket Velocity<sub>pre</sub>) + 86.223 (Smash ratio) + .270 (Racket<sub>stiffness</sub>) - .840 (String tension)] น่าจะนำมาใช้เป็นประโยชน์ เพื่ออธิบายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกได้ในระดับดี ใกล้เคียงค่าความเป็นจริงประมาณร้อยละ 89



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเรื่อง “การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ของนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ” ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิส และการทดสอบการเสิร์ฟลูกด้วยเครื่องทดสอบ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ศึกษาถึงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ อัตราเร่ง และความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกแฟลท์ ด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศรวม 3 รูปแบบโครงสร้าง (สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงรี) และในขั้นตอนที่ 2 ศึกษาโมเดลเพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ จากนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในขั้นตอนแรก มาประกอบรวมในโมเดลสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายความเร็วของลูกเทนนิส (predictive impact model) เนื่องจากเป็นข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการเสิร์ฟของนักกีฬา

### สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย “การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ของนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ” จากการทดสอบการเสิร์ฟลูกด้วยเครื่องทดสอบ และการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ศึกษาถึง อัตราเร่ง และความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกแฟลท์ ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศรวม 3 รูปแบบโครงสร้าง (สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงรี) กำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูง (ความเร็วรอบมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm) เพื่อให้มีความเร็วของหน้าไม้แร็กเกต ณ จุดกลางหน้าไม้ก่อนกระทบ อยู่ระหว่าง  $30-35 \text{ ms}^{-1}$  ใกล้เคียงกับความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในการแข่งขันระดับนานาชาติ (Chow et al., 2003) และกำหนดตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสทั้ง 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน เลือกลูกเทนนิสที่เข้ากระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุด ตำแหน่งละไม่เกิน 5 ผลการทดสอบ แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องของลูกเทนนิสและไม้แร็กเกตแบบ 3 มิติ

ในขั้นตอนที่ 2 ศึกษาโมเดลเพื่อใช้ในการทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแบล็ก ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ จากนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (Smash ratio:  $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นตอนที่ 1 มาประกอบรวม ในการสร้างโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก เนื่องจากเป็นข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการเสิร์ฟของนักกีฬา ตามกรอบแนวความคิดในการวิจัย (ในบทที่ 2) เป็นการศึกษาโมเดลที่ได้จากประสบการณ์ในสภาวะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) จึงน่าจะสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ และอธิบายเหตุการณ์ต่างๆ ได้โดยตรง

#### ผลการวิจัยพบว่า

1. ผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR สรุปผลการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แรกเกิด จากรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์แรกคือ RR ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแบล็กโดยตรง จากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดระดับความเร็วของไม้แรกเกิดที่ระดับสูงความเร็วรอบของมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm นำข้อมูลมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่อง ขณะลูกกระทบเอ็นบนหน้าไม้เทนนิสแบบ 3 มิติ พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ไม้แรกเกิด RR ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่าสูงที่สุด ( $1.444 \pm 0.012$ ) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ โดยค่าเฉลี่ยอัตราส่วนรองลงมาคือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แรกเกิด (GSC) ซึ่งใกล้เคียงกับจุดกระทบที่ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม (0, -30) และจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา (30, 0) โดยค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าน้อยที่สุด โดยค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แรกเกิด (Smash ratio) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แรกเกิด (GSC) ร้อยละ 2.049 ซึ่งน่าจะเป็นจุดกระทบที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแบล็ก ขณะความเร็วของหน้าไม้แรกเกิดก่อนกระทบลูกเทนนิสเฉลี่ย 30.84 เมตรต่อวินาที หรือมีความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แรกเกิด เท่ากับ 49.98 เรเดียนต่อวินาที

2. ผลการวิจัยใน 3 รูปแบบโครงสร้างคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) จากขั้นตอนที่ 1.2 ซึ่งเป็นการศึกษาความแตกต่างของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แรกเกิด 3 รูปแบบโครงสร้าง ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรง จากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ และกำหนดระดับความเร็วของไม้แรกเกิดที่ระดับสูงความเร็วรอบของมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm เช่นเดิม พบค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ของจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) ของไม้แรกเกิดโครงสร้างทั้งสาม (3R) มีค่ามากที่สุด และมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แรกเกิด (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 1.811 เช่นกัน และจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) ยังคงมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.880 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าอัตราส่วนในสามรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แรกเกิดและจุดกระทบทั้งห้า พบว่าค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แรกเกิด (Smash ratio) ของสามรูปแบบโครงสร้าง ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างจากตำแหน่งจุดกระทบที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  แสดงว่า ค่าอัตราส่วนแต่ละตำแหน่งจุดกระทบน่าจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการการเสิร์ฟลูกแรก หรือลูกแฟลท์ อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าอัตราส่วนนี้ ระหว่างโครงสร้างไม้แรกเกิดทั้งสามรูปแบบ แสดงถึงโครงสร้างไม้แรกเกิดทั้งสามรูปแบบ ไม่น่าจะมีความแตกต่างกันต่อผลประสิทธิภาพในการการเสิร์ฟลูกแรก ดังนั้นในขั้นตอนที่ 2 จึงเป็นการศึกษาวิจัยต่อเนื่อง เพื่อสร้างโมเดลหรือสมการถดถอยที่ใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุด ในการเสิร์ฟลูกแรกในรูปแบบโครงสร้างรวม (3R) ซึ่งน่าจะใช้เป็นตัวแทนกลางของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง

3. ในขั้นตอนที่ 2 สร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกจากนักกีฬา ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอิสระ 5 ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิจัย จากการเก็บข้อมูลบันทึกภาพกล้องวิดีโอความเร็วสูง เพื่อใช้วิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติในการเสิร์ฟลูกแรกจากนักเทนนิสเยาวชนทีมชาติ โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แรกเกิดที่เป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบโครงสร้าง คือ สี่เหลี่ยม (RR), สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) สามารถบันทึกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีและตรงตามตำแหน่งที่ต้องการรวม จำนวน 167 ผลการวิเคราะห์ภาพ นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน เพื่อทดสอบหาสมการในการทำนายความเร็วลูกเสิร์ฟลูกแรก (predictive impact model) พบว่า อิทธิพลปัจจัยตัวแปรอิสระที่เกิดจากองค์ประกอบด้านทักษะเทคนิค ในการเสิร์ฟลูกแรกจากตัวนักกีฬาเป็นหลักคือ ค่าความเร็วไม้แรกเกิดก่อนเข้ากระทบลูกเทนนิส ( $Racket\ Velocity_{pre}$ ) มีอิทธิพล หรือผลมากที่สุดถึงร้อยละ 76.2 ( $\beta = .762$ ) และค่าอัตราส่วนในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ (Smash ratio) ซึ่งทำให้ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 67.1 ( $\beta = .671$ )

โดยมีปัจจัยตัวแปรที่เกิดจากองค์ประกอบร่วมด้านคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ของไม้แร็กเกตได้แก่ ค่าความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต ( $Racket_{stiffness}$ ) ทำให้ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.6 ( $\beta = .546$ ) และค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension) ที่มีอิทธิพลในทางตรงกันข้าม ทำให้มีค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลดลงร้อยละ 32.9 ( $\beta = -.329$ ) โดยมีค่าคงที่เริ่มต้นที่ - 25.978 หน่วย (constant = - 25.978) ส่วนค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (Swing weight) ซึ่งถูกขจัดหรือคัดออกจากสมการถดถอย จึงไม่น่าจะมีอิทธิพล หรือมีผลน้อยมากต่อการทำนายความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก ยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย ( $R^2 = .898$ ) สามารถทำนายตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระสี่ตัวแปรร้อยละ 89.8 สรุปโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายนี้ สามารถอธิบายและทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกระดับดีร้อยละ 89 ดังสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนายความเร็วในการเสิร์ฟลูกแรกในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส [predictive impact model;  $Ball\ Velocity_{post} = -25.978 + .970 (Racket\ Velocity_{pre}) + 86.223 (Smash\ ratio) + .270 (Racket_{stiffness}) - .840 (String\ tension)$ ] น่าจะนำมาใช้เป็นประโยชน์ เพื่ออธิบายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกได้ในระดับดี ใกล้เคียงค่าความเป็นจริง ประมาณร้อยละ 89

### อภิปรายผล

จากการวิจัยเรื่อง “การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแร็กเกตของนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ” ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการเสิร์ฟลูกแรก ของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ และการทดสอบการเสิร์ฟลูกแร็กเกตด้วยเครื่องทดสอบ เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยทำนายความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรกเป็นการศึกษาโมเดลที่ได้จากประสบการณ์ในสภาวะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) โมเดลนี้ จึงสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์และอธิบายได้โดยตรง อย่างไรก็ตามไม่ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวกับด้านทักษะเทคนิคในการส่งแรงจากตัวนักกีฬา แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ศึกษาถึงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ อัตราเร่ง และความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกแร็กเกตด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศ รวม 3 รูปแบบโครงสร้าง (สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงรี) ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ศึกษาโมเดลสมการถดถอย เพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแร็กเกต จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ สังกัดลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทย จำนวน 6 คน โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (Smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในขั้นตอนแรก มาประกอบในโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรกในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยแบ่งการนำเสนอเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ จากผลการทดสอบการเสิร์ฟลูกด้วยเครื่องทดสอบในแต่ละผลิตภัณฑ์ตามกระบวนการทดสอบรวม 3 รูปแบบโครงสร้าง (สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงรี) โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูง ใกล้เคียงกับความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในการแข่งขันระดับนานาชาติ รวมทั้งกำหนดตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสทั้งห้าตำแหน่งด้วย

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาโมเดลเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟล็ต จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ตัวแปรอิสระบางส่วนที่ได้มาตรฐานจากการทดลอง ด้วยเครื่องทดสอบในขั้นตอนแรกมาประกอบรวม ในโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนาย (predictive impact model)

**ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ จากผลการทดสอบการเสิร์ฟลูกด้วยเครื่องทดสอบในแต่ละผลิตภัณฑ์ ตามกระบวนการทดสอบ รวม 3 รูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูง รวมทั้งกำหนดตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสทั้งห้าตำแหน่งด้วย**

ในตารางที่ 3 แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างคือ สี่เหลี่ยม (RR) , สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) ซึ่งเป็นไม้รุ่นเดียวกันอันใหม่ที่นักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขันระดับนานาชาติ พบว่า ทำจากวัสดุชนิด Graphite เหมือนกัน แตกต่างกันที่รูปแบบโครงสร้างและวัสดุส่วนประกอบเพิ่มเติม ไม้แร็กเกตทั้งสามโครงสร้างมีความยาวเท่ากัน 68.58 ซม. มีน้ำหนักพร้อมเอ็นมีค่าระหว่าง 312–338 กรัม ขนาดหน้าไม้แร็กเกตมีพื้นที่ระหว่าง 95-100 ตารางนิ้ว ซึ่งเป็นหน้าไม้ขนาด Mid-plus (พื้นที่ 94-105 ตร.น) ทั้งนี้ โมเมนต์ความเฉื่อยที่เกิดขึ้นขณะการออกแรงตี (moment of inertia) หรือน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (swing weight) มีค่าระหว่าง 317–327 ค่าความแข็งแกร่งของไม้แร็กเกต (stiffness) มีค่าระหว่าง 52–63 และส่วนใหญ่มีจุดสมดุลของน้ำหนักไม้ (balance) มาก ซึ่งเป็นระยะห่างจากจุดสมดุลของมวลไม้แร็กเกต (racket mass) ถึงปลายหัวไม้ ดังนั้นไม้แร็กเกต RT มีพื้นที่หน้าไม้มากที่สุด ส่วนค่าน้ำหนักการกระจายแรงเหวี่ยงของโครงสร้างไม้ RO มีค่ามากที่สุด โดยค่าความแข็งแกร่งของไม้แร็กเกต RR เท่ากับ RO และมากกว่า RT และส่วนใหญ่มีจุดสมดุลของน้ำหนักไม้ นับจากปลายหัวไม้มาก คือ 7 (น้ำหนักที่หัวไม้เบา) ยกเว้น RO ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 แสดงถึงน้ำหนักที่หัวไม้มากกว่า เป็นไปตามคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์และอยู่ในข้อกำหนดสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (ITF, 2009)

ทั้งนี้ ในการเลือกไม้แร็กเกตของนักเทนนิส ขึ้นอยู่กับสไตล์การเล่น และความพึงพอใจ แต่คนในการเลือกไม้แร็กเกต อย่างไรก็ตาม ถ้าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงไม้แร็กเกตมาก ( $RO > RT > RR$ ) จะทำให้ต้องออกแรงเพิ่มขึ้นในการตี เพื่อเอาชนะโมเมนต์ความเฉื่อย ส่งผลทำให้ไม้แร็กเกตมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นนักกีฬาที่มีความแข็งแรงกล้ามเนื้อแขนดี จะเลือกไม้แร็กเกตที่น้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงมาก นอกจากนี้ค่าน้ำหนักการกระจายแรงเหวี่ยง สามารถทำให้เพิ่มมากขึ้นได้ โดยวิธีการเพิ่มน้ำหนักที่ปลายหัวไม้แร็กเกต อย่างเช่นการถ่วงน้ำหนักที่เท่ากัน (เช่น น้ำหนัก 5 กรัม) ที่ปลายหัวไม้ ของส่งผลลัพธ์ทำให้ค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต มีค่าเพิ่มมากกว่าจุดกลางหน้าไม้ ส่วนค่าแสดงความแข็งแกร่งของไม้แร็กเกตนั้น ในขณะที่ตีโฟร์แฮนด์ที่ใช้ความเร็วไม้แร็กเกตต่ำ หรือขณะวางไม้เพื่อรับลูก และการยึดไม้ขึ้นอยู่กับที่เพื่อทดลอง ถ้าความแข็งแกร่งของไม้แร็กเกตมากกว่า ( $RR, RO$  มากกว่า  $RT$ ) จะทำให้ลูกเทนนิสขณะที่กระทบ มีการสูญเสียพลังงานให้กับไม้้น้อยกว่า จึงส่งผลทำให้ลูกเทนนิสหลังการกระทบมีความเร็วมากกว่า รวมถึงในขณะเสิร์ฟลูกแรก หรือการวอลเลย์ตบลูก ซึ่งความเร็วของไม้แร็กเกตเพิ่มสูงมาก ทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสหลังจากกระทบ ยังมีค่ามากขึ้นอีก ดังนั้นไม้แร็กเกตที่มีค่าความแข็งแกร่งที่สูง จะมีประสิทธิภาพในการส่งลูกเทนนิส หรือตีกว่า ซึ่งเหมาะกับนักกีฬาที่มีความแข็งแรงกล้ามเนื้อดี สามารถควบคุมและออกแรงเสิร์ฟได้ ส่งผลทำให้ลูกที่เสิร์ฟมีความเร็วสูงและรุนแรง ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าความตึงของเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต ถ้าความตึงมีค่าอยู่ในช่วงหนึ่งที่เหมาะสม และหย่อนลงเล็กน้อย จะช่วยทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสเพิ่มขึ้น เนื่องจากขณะเสิร์ฟลูกเทนนิสที่เข้ากระทบเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต ความตึงของเอ็นที่หย่อนลงเล็กน้อย ทำให้สามารถสะสมพลังงานไว้ได้ดีและส่งแรง ในขณะที่สปริงตัวกลับได้ดีกว่า จึงส่งผลทำให้ลูกเทนนิสหลังการกระทบมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น (Brower, Cross, 2005) ดังนั้นในการเลือกไม้แร็กเกตของนักเทนนิส ซึ่งขึ้นอยู่กับสไตล์การเล่นแต่ละคนนั้น ถ้านักกีฬาที่รูปร่างไม่สูงนัก มีความแข็งแรงกล้ามเนื้อแขนและขาปานกลาง และไม่สามารถออกแรงเสิร์ฟที่มีความเร็วสูงและรุนแรงได้ ควรเลือกไม้แร็กเกตที่มีรูปแบบโครงสร้างเป็นสี่เหลี่ยม ( $RR$ ) เพราะค่าความเร็วของลูกเทนนิส ณ ตำแหน่งจุดกระทบทั้งห้ามีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถที่จะควบคุมทิศทางในการเสิร์ฟลูกแรก ได้อย่างมีประสิทธิภาพในด้านความแม่นยำ มากกว่าเน้นการใช้ความเร็วของลูกเทนนิส แต่ถ้านักกีฬาที่รูปร่างสูง มีความแข็งแรงกล้ามเนื้อแขนและขาดี สามารถควบคุมทิศทางได้ การออกแรงเสิร์ฟได้มาก จะทำให้ลูกที่เสิร์ฟมีความเร็วสูงและรุนแรงมากขึ้น ควรเลือกไม้แร็กเกตที่มีรูปแบบโครงสร้างเป็นวงรี ( $RO$ ) เพราะจะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในด้านความเร็วของลูกเทนนิส ขณะการเสิร์ฟลูกแรก ดังกราฟในรูปที่ 9

ในตารางที่ 2 แสดงค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกตจากสามรูปแบบโครงสร้างในแต่ละผลิตภัณฑ์ตัวอย่างด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแพลล์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดระดับความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูงความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 450 rpm ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกตเท่ากับ  $49.98 \pm 0.003$  เรเดียนต่อวินาที ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) หรือ ค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้ ณ จุดกระทบที่ 3 (GSC) ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง และเมื่อเปรียบเทียบกันมีค่าใกล้เคียงกันมาก มีค่าอยู่ระหว่าง 30.816-30.884 เมตรต่อวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในการแข่งขันระดับนานาชาติ (Chow et al., 2003) ดังนั้นจึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกต และจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่ง รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบ ระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งของสามโครงสร้าง ทั้งนี้ลูกเทนนิสที่ถูกปล่อยลงมาจากด้านบนเหนือไม้เทนนิส คล้ายกับการเสิร์ฟจริง โดยค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบ (Pre-impact ball velocity) ของไม้แร็กเกต RR มีค่าระหว่าง 2.244 ถึง 3.678 เมตรต่อวินาที และมีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับตำแหน่งจุดกระทบ ในตารางที่ 1 โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของ ค่าเฉลี่ยในรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกต ใน 3 รูปแบบโครงสร้างและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่ง พบว่า ค่าความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบของรูปแบบโครงสร้างทั้งสาม มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ ยกเว้นตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 (GSC) กับตำแหน่งจุดกระทบที่ 5 ทั้งนี้ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความเร็วของลูกเทนนิสก่อนกระทบระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามด้วย

อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact ball velocity) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (30, 0) ของไม้แร็กเกต RR, RT และ RO เท่ากับ  $44.436 \pm 0.226$ ,  $45.401 \pm 0.769$  และ  $45.491 \pm 0.705$  เมตรต่อวินาที เรียงตามลำดับ ดังตารางที่ 2 มีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในสามรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้ง 5 ตำแหน่ง พบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือในสามรูปแบบ ดังตารางที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ ระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสาม พบว่ารูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกต RO (วงรี) และ RT (สามเหลี่ยม) มีค่ามากกว่า RR (สี่เหลี่ยม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เช่นกัน

สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบบนเอ็นหน้าไม้ต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ของจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) ของไม้เร็กเกตโครงสร้าง RR, RT และ RO มีค่าสูงที่สุดเช่นกัน เท่ากับ  $1.444 \pm 0.012$ ,  $1.475 \pm 0.036$  และ  $1.472 \pm 0.030$  เรียงตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้เร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049, 1.872 และ 1.377 เรียงตามลำดับ ในตารางที่ 2 โดยค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้เร็กเกตของรูปแบบโครงสร้างรวม (3R) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่ามากที่สุดและมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้เร็กเกต (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 1.811 เช่นกัน และจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.880 ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าอัตราส่วนในสามรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้เร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้า พบว่า ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้เร็กเกต (Smash ratio) ของสามรูปแบบโครงสร้างคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างจากตำแหน่งจุดกระทบที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ในรูปที่ 18 แสดงว่า ค่าอัตราส่วนแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ น่าจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการการเสิร์ฟลูกแรก อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าอัตราส่วนนี้ ระหว่างโครงสร้างไม้เร็กเกตทั้งสามรูปแบบ หมายถึงรูปแบบโครงสร้างไม้เร็กเกตทั้งสามคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) ไม่น่าจะมีความแตกต่างกันต่อผลประสิทธิภาพในการการเสิร์ฟลูกแรก รวมถึงไม่พบความแตกต่างในการปฏิสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนระหว่างรูปแบบโครงสร้างไม้เร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้าตำแหน่งเช่นเดียวกับค่าตัวแปรอื่นๆ แสดงว่าโครงสร้างไม้เร็กเกตไม่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งจุดกระทบที่กำหนดไว้

ดังนั้นการศึกษาวิจัยต่อเนื่องในขั้นตอนที่ 2 เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยในการทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก น่าจะดำเนินการเก็บข้อมูลทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง เพื่อเป็นตัวแทนที่มีความหลากหลาย แล้วสร้างสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายตำแหน่งจุดกระทบต่างๆบนเอ็นหน้าไม้ในรูปแบบโครงสร้างรวม (3R) ซึ่งน่าจะใช้เป็นตัวแทนกลางของทั้งสามรูปแบบโครงสร้างต่อไป โดยใช้ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้เร็กเกต (Smash ratio) เป็นตัวแปรอิสระที่สำคัญตัวหนึ่งในการสร้างสมการถดถอย



**ขั้นตอนที่ 2** การศึกษาโมเดลเพื่อทำนายตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ที่ทำให้เกิดความเร็วยุติสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ตัวแปรอิสระบางส่วนที่ได้มาตรฐานจากการทดลอง ด้วยเครื่องทดสอบในขั้นตอนแรกมาประกอบรวม ในโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนาย (predictive impact model)

ในขั้นตอนที่ 2 เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วยุติสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกจากนักกีฬา สรุปผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปร 5 ตัวแปรอิสระสำคัญที่ใช้ในการวิจัย จากการเก็บข้อมูลบันทึกภาพกล้องวิดีโอความเร็วสูง เพื่อใช้วิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ ในการเสิร์ฟลูกแรก จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตที่เป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบโครงสร้างนำมาขึ้นเอ็นชนิดเดียวกันยี่ห้อ Babolat-Pro Hurricane เช่นเดิม โดยมีความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตตามที่ตนเองเคยใช้ในรายการการแข่งขันต่างๆระหว่าง 50-60 ปอนด์ คัดเลือกข้อมูลลูกเสิร์ฟเฉพาะการเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ (5 ตำแหน่งจุดกระทบ) ของนักเทนนิสแต่ละบุคคล สามารถเก็บบันทึกภาพวิดีโอลูกเสิร์ฟที่ดีและตรงตามตำแหน่งที่ต้องการจากนักกีฬา 3 กลุ่ม (รูปแบบโครงสร้าง) รวม 6 คน จำนวน 223 ผลการทดสอบ พบว่าประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติในทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง นักเทนนิสสามารถเสิร์ฟตรงตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, 30: a half ball distance above) มากที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 60.2 อันดับที่สองรองลงมาได้แก่จุดกระทบบนตำแหน่งเอ็นหน้าไม้เทนนิส จุดกระทบที่ 3 ที่กึ่งกลางหน้าไม้แร็กเกต (0, 0: GSC) เฉลี่ยร้อยละ 21.3 และรองลงมาอีกเป็นจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60: a ball distance above) เฉลี่ยร้อยละ 14.2 โดยจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา 30 มม. (30, 0: a half ball distance shift to right) และจุดกระทบ 4 ใต้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, -30: a half ball distance below) น้อยที่สุด เฉลี่ยเพียงร้อยละ 3.3 และร้อยละ 1.0 เรียงตามลำดับ ดังตารางที่ 7(a) สอดคล้องกับ เฉลิม ชัยวัชรภรณ์และคณะ (2555) รายงานการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติในการเข้าร่วมแข่งขันทั้งสองรายการแข่งขันเทนนิสรุ่นชายเดี่ยว พบว่านักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติกลุ่ม ITF-Pro ซึ่งเป็นนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ ที่มีอันดับนักเทนนิสอาชีพของสหพันธ์เทนนิสนานาชาติแล้ว (ITF) จำนวน 3 คน พบว่านักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติของไทยคนแรก มี ITF อันดับที่ 557 หรือมีอันดับที่ดีที่สุดในกลุ่ม ซึ่งมีจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ณ ตำแหน่งเหนือจุดกลางหน้าไม้ 2.5 ซม. มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 75 น่าจะสามารถเสิร์ฟลูกแรกได้ดีและประสิทธิภาพที่สุด รองลงมาเป็นนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติของไทยคนที่สาม มี ITF อันดับที่ 1,183 หรือมีอันดับที่สามในกลุ่ม โดยจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสคิดเป็น ร้อยละ 42.7 น่าจะสามารถเสิร์ฟลูกแรกได้ดีและประสิทธิภาพเป็นอันดับที่สอง และนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติของไทยคนที่สอง (P2) มี ITF อันดับที่ 859 หรือมีอันดับที่

สองในกลุ่ม ซึ่งมีจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 30 น่าจะสามารถเสิร์ฟลูกแรก และได้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด

รวมถึงสอดคล้องกับภาสกร วัธนธาดาและคณะ (2548) ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟกับระดับความสูงบริเวณหน้าแร็กเกตที่กระทบกับลูกเทนนิส โดยจำลองการแข่งขันแมทช์ประเภทชายเดี่ยว จากนักเทนนิสชายที่อยู่ในอันดับที่ 23 และ 27 ลอนเทนนิสสมาคมแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ จำนวน 2 คน พบว่านักเทนนิสเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 110 หรือ (ประมาณ 176 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และ 89 ไมล์ต่อชั่วโมง เรียงตามลำดับเปอร์เซ็นต์การเสิร์ฟของลูกแรกของนักเทนนิสทั้ง 2 คน คือ 43% และ 41% ระดับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟและตำแหน่งที่ลูกกระทบหน้าแร็กเกต พบว่าอยู่ในระดับต่ำ ยกเว้นระดับความสัมพันธ์ของลูกเสิร์ฟแรกของนักเทนนิสคนแรกที่มีค่า 0.50 ซึ่งถือว่าสูงสำหรับตัวแปรทั้งสองในสภาพการแข่งขันมีระดับความสูงลูกเทนนิสขณะกระทบหน้าไม้แร็กเกตทั้งลูกแรกและลูกที่สองเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20-22 นิ้ว เนื่องจากบริเวณข้อมือขวา โดยการเสิร์ฟลูกแรกจะอยู่สูงกว่าลูกที่สอง เฉลี่ยประมาณ 1 นิ้ว (ประมาณ 25.4 มม.) จึงเป็นการยืนยันว่าในการเสิร์ฟลูกแรกได้ดีและประสิทธิภาพที่สุด ตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส น่าจะอยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้แร็กเกตประมาณ 30 มม. ขณะความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบบนเอ็นหน้าไม้มีค่าอยู่ระหว่าง 30-35 เมตรต่อวินาที

ทั้งนี้ จากผลการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติในนักกีฬา จำนวนทั้งสิ้น 167 ผลการวิเคราะห์ภาพ พบว่า ค่าความเร็วของลูกเทนนิสสูงสุด (maximum velocity of ball) หลังกระทบเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต RR ณ ณ ตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้ (GSC) พบว่ากราฟความเร็วของลูกเทนนิสจากการวิเคราะห์ในภาพที่ 4 ขณะเข้ากระทบเต็มลูก (4<sup>th</sup> frame of ball inbound: No-333) มีความเร็วของลูกเทนนิสน้อยมากเกือบหยุดนิ่งในขณะที่เสิร์ฟลูกแรกของนักกีฬา เท่ากับ 4.043 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) ดังรูปที่ 19(a) (เส้นกราฟตัดกับเส้นตรงในแนวแกนตั้ง) ต่อจากนั้นลูกเทนนิสเริ่มเคลื่อนที่ออกจากเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต และมีความเร็วของลูกเทนนิสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [รูปที่ 19(b), กราฟตัดกับเส้นตรงแกนตั้ง] มีค่าเท่ากับ 50.043 เมตรต่อวินาที หลังจากที่ค่าอัตราเร่งของลูกเทนนิสเริ่มลดลงเหลือ  $183.1 \times 10^2$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ( $\text{ms}^{-2}$ ) สอดคล้องกับไวต์ (White, 2011) ได้รายงานที่ค่าอัตราเร่งที่น่าสนใจจากการเตะลูกฟุตบอล และการตีลูกเบสบอลด้วยไม้เบสบอล (bat) พบว่าค่าอัตราเร่งของลูกฟุตบอล และลูกเบสบอล มีค่าประมาณ  $30 \times 10^2$  และ  $300 \times 10^2$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> เรียงตามลำดับ และใช้เวลาเข้ากระทบใกล้เคียงกันมากประมาณ 4 มิลลิวินาที (millisecond) คล้ายกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 จากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามพบว่า ความเร็วของลูกเทนนิสมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่งและมีค่าสูงสุด [รูปที่ 19(c), กราฟตัดกับเส้นตรงแกนตั้ง] ในขณะที่ลูกเคลื่อนที่ออกจากเอ็นบนหน้าไม้แล้วสีภาพ (No-342) มีค่าเท่ากับ 55.882 เมตรต่อวินาที หรือ 201.2 กม/ชม สอดคล้องกับชัยสิทธิ์ ภาวิลาส

และคณะ (2544 และ 2549) ที่ได้ศึกษาในการวิเคราะห์ความเร็วลูกและความแม่นยำในการเสิร์ฟของนักเซปักตะกร้อหญิงทีมชาติ โดยพบว่า ลักษณะรูปร่างของกราฟความเร็วและอัตราเร่งที่เกิดขึ้นดังกล่าวคล้ายกัน ในขณะที่ความเร็วของหน้าไม้แรกเกิดก่อนการเข้ากระทบในการวิจัยครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 40.060 เมตรต่อวินาที หรือ ประมาณ 144.2 กม./ชม. ซึ่งเป็นนักกีฬาที่มีรูปร่างสูง และสามารถเสิร์ฟลูกแรกได้เร็วรุนแรง (จาก Subject-RR1, Ht = 183 cm., Wt = 85 kg ในตารางที่ 6) อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการเสิร์ฟลูกแรกจะลดลงในขณะที่แข่งขันจริง เมื่อเปรียบเทียบกับ การฝึกซ้อม ทำให้ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดและลูกเทนนิสลดลง เนื่องจากมีความกังวลเข้ามาาร่วม รวมถึงต้องคำนึงถึงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพความสำเร็จในการเสิร์ฟด้วย ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากขณะที่ หน้าไม้แรกเกิดเข้ากระทบลูกเทนนิส มีการให้ตัวของข้อมือ (flexibility) จากนักกีฬา แล้วจึงมีการส่งแรงต่อเนื่องจากข้อมือที่มีทักษะการเสิร์ฟที่ดี หรือมีการสับตข้อมือของนักกีฬาเพื่อให้มีอัตราเร่งส่งต่อไปยังลูกเทนนิสอีกครั้ง (follow through) ทำให้ความเร็วของลูกเทนนิสมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการเสิร์ฟลูกแพลส์โดยตรงจากเครื่องทดสอบ (แตกต่างกันที่ขณะที่เข้ากระทบ ไม้แรกเกิดในห้องปฏิบัติการ อีกระยะจากแรงขับเคลื่อนของมอเตอร์) เฉลี่ยน่าจะประมาณ ร้อยละ 10.4 ทั้งนี้ ควรจะมีการวัดค่าของแรงที่เกิดขึ้นจริงบริเวณที่จับของไม้แรกเกิดร่วมด้วย

สอดคล้องกับโชว์และคณะ (Chow et al., 2003) ที่รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการเสิร์ฟลูกแรกและลูกที่สองจากนักเทนนิสประเภทเดี่ยวในกีฬาโอลิมปิกที่แอตแลนต้า ปี ค.ศ. 1996 พบว่า การเสิร์ฟลูกแรกนั้น ค่าเฉลี่ยความเร็วของลูกเสิร์ฟลูกแรกในประเภทชายเดี่ยว เท่ากับ 50.33 เมตรต่อวินาที ( $\text{ms}^{-1}$ ) หรือ 181.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/hr) ทั้งนี้ ความสามารถในการเสิร์ฟลูกแรกจะลดลงในขณะที่เข้าร่วมการแข่งขันจริง เนื่องจากมีความกังวลและปัจจัยอื่นๆมาประกอบ ซึ่งทำให้ค่าความเร็วของไม้แรกเกิดและลูกเทนนิสลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การจำลองการเสิร์ฟลูกแรกในการวิจัยครั้งนี้ (55.88 เมตรต่อวินาที) อย่างไรก็ตาม จากการรายงานผลการแข่งขันกีฬาเทนนิสในระดับนานาชาติ (Cross, Pollard, 2009: ITF, 2009) พบว่านักเทนนิสชายระดับแนวหน้าของโลก สามารถเสิร์ฟลูกเทนนิสให้มีความเร็วสูงสุดถึง 259 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือเท่ากับ 71.94 เมตรต่อวินาที (โดย Ivo Karlovic) และพบว่านักเทนนิสหญิงระดับแนวหน้าของโลก สามารถเสิร์ฟลูกเทนนิสให้มีความเร็วสูงสุด 208 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือเท่ากับ 57.78 เมตรต่อวินาที (โดย Venus Williams) เช่นกัน

ในตารางที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรอิสระที่ทำนายตัวแปรตามแบบการคัดเลือกลำดับขั้น (Multiple Regression; Stepwise) จากวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ จากลูกเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งจุดกระทบๆละไม่เกิน 5 ผลการทดสอบ รวมทั้งสิ้น 167 ผลการวิเคราะห์ภาพ ( $n^{\#}$ )

นำมาสร้างโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนายความเร็วของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรอิสระห้าตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม ด้วยวิธีทดสอบค่าเอฟ (F-test) เท่ากับ 668.019 และพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ  $p < 0.05$  จึงดำเนินการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพล หรือผลต่อการทำนายตัวแปรตามคือ ความเร็วของลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรกต่อผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนดิบ ( $B$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ( $SE$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบคะแนนมาตรฐาน ( $\beta$ ) รวมถึงทดสอบค่าที่ ( $t$ ) ของตัวแปรอิสระในแต่ละตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตาม ดังตารางที่ 9 พบว่า โมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกนี้ ค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball: Ball Velocity<sub>post</sub>) ที่เพิ่มขึ้น เป็นเกิดจากตัวแปรอิสระแรกคือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of Racket: Racket Velocity<sub>pre</sub>) ซึ่งเป็นตัวทำนายทางบวกต่อค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ มีอิทธิพล หรือผลมากที่สุดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 76.2 ( $\beta = .762$ ) ในขณะที่ค่าตัวแปรอิสระที่เหลือทุกตัวมีค่าคงที่ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในแบบค่าคะแนนดิบ ( $B$ ) ของความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ เท่ากับ .970 ( $B = .970$ ) แสดงว่า ถ้าค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ 100.0 กม/ชม. (km/hr) จะมีผลมาจากค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ เท่ากับ 97.0 กม/ชม. (km/hr) ที่เหลือจะเกิดจากตัวแปรอิสระอื่นๆอีกสามตัวแปรอิสระ และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  และมีค่าคงที่เริ่มต้นเท่ากับ -25.978 (constant = -25.978)

ดังนั้นสมการถดถอยในการทำนายความเร็วลูกเสิร์ฟลูกแรกในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนหน้าไม้เทนนิส (predictive impact model) แสดงไว้ในสมการทำนายในรูปแบบค่าคะแนนดิบ ดังนี้

$$\text{Ball Velocity}_{\text{post}} = -25.978 + .970 (\text{Racket Velocity}_{\text{pre}}) + 86.223 (\text{Smash ratio}) + .270 (\text{Racket}_{\text{stiffness}}) - .840 (\text{String tension})$$

โดย...

Ball Velocity<sub>post</sub> คือ ค่าการทำนายความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก (km/hr)

Racket Velocity<sub>pre</sub> คือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนเข้ากระทบลูกเทนนิส (km/hr)

Smash ratio คือ ค่าอัตราส่วนเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ (ratio)

Racket<sub>stiffness</sub> คือ ค่าความแข็งแกร่งของไม้แร็กเกตจากคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของแต่ละผลิตภัณฑ์ (Hz; RDC Unit)

String tension คือ ค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (lbs)

สอดคล้องกับโบรดีและครอสส์ (Brody, Cross, 2002) ได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการเสิร์ฟเทนนิสครั้งแรก โดยใช้โมเดลการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวด้วยกล้องที่สามารถบันทึกภาพได้ 100 ภาพต่อวินาทีจากนักกีฬาพบว่า ลูกเสิร์ฟที่มีความเร็ว  $45 \text{ ms}^{-1}$  (162 km/hr หรือ 100 mile/hr) เกิดขึ้นจากรีแอกเกตกระทบลูกที่ตำแหน่งบนเอ็นที่มีความเร็ว  $35 \text{ ms}^{-1}$  (126 km/hr หรือ 79 mile/hr) มีสมการได้แก่  $V = (1+e_A) V_p$  โดย  $V$  คือ ความเร็วลูกเสิร์ฟเทนนิส  $V_p$  คือ ความเร็วรีแอกเกตที่ตำแหน่งกระทบลูกเทนนิสและ  $e_A$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (apparent coefficient of restitution) ในที่มีค่าเท่ากับ 0.29 และจะมีค่าประมาณ 0.4 ที่กลางหน้าไม้รีแอกเกตเทนนิสจากห้องปฏิบัติการ ดังนั้นความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (162 km/hr) เกิดขึ้นจากความเร็วไม้รีแอกเกตก่อนกระทบลูกที่ตำแหน่งบนเอ็นที่มีความเร็ว  $35 \text{ ms}^{-1}$  (126 km/hr) ซึ่งมีผลมากที่สุด ถึงร้อยละ 77.8 เช่นกัน โดยส่วนที่เหลือยังไม่ได้อธิบายรายละเอียดว่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสเกิดจากค่าตัวแปรอิสระตัวใด นอกจากแสดงค่าสัมประสิทธิ์ในการเข้ากระทบระหว่างลูกเทนนิสและเอ็นบนหน้าไม้รีแอกเกต ( $e_A$ ) ในที่มีค่าเท่ากับ 0.29 หรือมีผลรวม ร้อยละ 31.2 ซึ่งผลการวิจัยครั้งนี้สามารถอธิบายรายละเอียดถึงอิทธิพลจากปัจจัยตัวแปรต่างๆได้มากยิ่งขึ้น ดังจะได้กล่าวต่อไป

ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพล หรือผลต่อค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรกรองลงมา คือ ค่าอัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อไม้รีแอกเกต (Smash ratio:  $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) ซึ่งทำให้เพิ่มขึ้น .671 ( $\beta = .671$ ) หรือร้อยละ 67.1 รองลงอีกคือค่าความแข็งแกร่งของไม้รีแอกเกต (Stiffness of racket:  $\text{Racket}_{\text{stiffness}}$ ) ทำให้เพิ่มขึ้น .564 ( $\beta = .564$ ) หรือร้อยละ 56.4 ทั้งนี้ค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้รีแอกเกต (String tension) มีอิทธิพล หรือผลตรงกันข้ามทำให้ลดลง .329 ( $\beta = -.329$ ) หรือร้อยละ 32.9 แสดงว่า ค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้รีแอกเกตลดลงในช่วงที่เหมาะสม จะทำให้ความเร็วลูกเทนนิสเพิ่มขึ้น และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  ทั้งสามของค่าตัวแปรดังกล่าวข้างต้นเช่นกัน ส่วนค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้รีแอกเกต (Swing weight of racket) ถูกขจัดหรือคัดออกจากสมการสหสัมพันธ์เชิงซ้อนนี้ (Variable removed) จึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้รีแอกเกต น่าจะไม่มีผลหรือมีผลน้อยต่อการทำนายความเร็วลูกเสิร์ฟลูกแรก อย่างไรก็ตามอาจจะเกิดจากจำนวนข้อมูลที่ยังไม่เพียงพอ

สอดคล้องกับเฮค เอลเลน ซอพพิน และกูดวิลล์ (Haake, Allen, Choppin, Goodwill, 2007) พบว่า ขณะตีโพรแฮนด์ที่ใช้ความเร็วไม้รีแอกเกตต่ำ หรือขณะวางไม้เพื่อรับจุดกระทบในการกระดอนหรือความเร็วของลูกเทนนิสจะมากที่สุด (maximize ball rebound velocity) จะอยู่บริเวณใกล้คอของไม้ (racket throat) อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งจุดกระทบที่ทำให้ลูกเกิดความเร็วลูกเทนนิสสูงสุดเปลี่ยนแปลงได้เมื่อความเร็วของไม้รีแอกเกตเพิ่มขึ้นมากๆ อาทิเช่นในขณะที่เสิร์ฟลูก (serve) จุดกระทบที่ทำให้เกิดความเร็วของลูกเทนนิสจะมากที่สุดจะย้ายมาอยู่บริเวณปลายหัวไม้

แร็กเกต (racket tip) ซึ่งจาก ค.ศ. 1870s ถึง 2007 ความเร็วของลูกเทนนิสในขณะเสิร์ฟ (serve speed) เพิ่มขึ้น 17.5 % หรือเพิ่มขึ้น  $9.70 \text{ ms}^{-1}$  ทั้งนี้จากโมเดลที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสดังกล่าวที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากคอมพิวเตอร์ที่เป็นตัวแปรอิสระที่สำคัญในการคำนวณจากโมเดลเช่นกัน ได้แก่ ตัวแปรค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Pre-impact velocity of racket;  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ค่าความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต (Stiffness of racket; RDC Unit) และน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (Swing weight of racket; RDC Unit) รวมถึงความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (Brower, Cross, 2005; Goodwill, et al, 2003: String tension; lbs) เรียงตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยพหุคูณเชิงเส้น กับค่าความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Post-impact velocity of ball or Ball launch speed;  $64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ทั้งนี้ค่าตำแหน่งจุดกระทบที่ใส่ลงในซอฟต์แวร์ วัดได้จากระยะห่างจากปลายหัวไม้แร็กเกตถึงตำแหน่งที่เข้ากระทบ (mm) นั้น ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ค่าอัตราความเร็วลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกต (Smash ratio:  $\text{Ball}_{\text{post}}/\text{Racket}_{\text{pre}}$ ) แทนดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากคอมพิวเตอร์ ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณจากโมเดลที่ใช้ห้องปฏิบัติการ (Tennis GUT-ITF: Haake et al., 2007)

BALL		SURFACE	
Type	Pressurised	Type	Acrylic
Mass	57.1	Surface Pace Rating (SPR)	38
Diameter	66	Coefficient of friction	0.72
RACKET		Coefficient of restitution (COR)	0.82
Mass (g)	327	SHOT	
Balance point (mm)	307	Angular velocity of racket ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	72.1
Stiffness (RDC units)	50	Centre of rotation below wrist (mm)	220
Natural frequency (Hz)	120	Impact position from tip (mm)	100
Swingweight (RDC units)	277	Inbound ball velocity ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0
		Shot angle to horizontal (deg)	-6.5
		Initial ball spin ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	200

Table 3. Input parameters for a serve simulated by *Tennis GUT* to give an approximate ball launch speed of  $64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (145 mph).

รวมถึงสอดคล้องกับชอปปิน (Choppin, 2013; Head, 1976) ได้ศึกษาถึงความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสจากโมเดลที่ใช้ทำนายและการทดลองในห้องปฏิบัติการ กล่าวว่าในการวิจัยเพื่อพิสูจน์ตำแหน่งจุดกระทบจากการเสิร์ฟลูกแรก (first serve) หรือลูกแฟลต (flat serve) ด้วยวิธีการเสิร์ฟลูกโดยตรงจากนักกีฬา หรือจากเครื่องทดสอบ (real strike) ในห้องปฏิบัติการ ปัจจุบันมีรายงานศึกษาวิจัยดังกล่าวน้อยมาก เพราะมีข้อจำกัดในการทดลองหลายประการ ทั้งนี้ ในการเสิร์ฟลูกแรกที่ไม่เทนนิสมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมากเพื่อเข้ากระทบลูกเทนนิสที่เกือบจะหยุดนิ่งในขณะเสิร์ฟ ตำแหน่งจุด

กระทบที่ทำให้เกิดความเร็วลูกสูงสุดน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเดิม (sweet spot) เพราะเนื่องมาจากมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาร่วมด้วยอย่างเช่นความเร็วไม้แร็กเกตที่สูงมาก แรงส่งที่เข้ากระทบกัน (momentum) และแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น (moment of inertia) เป็นต้น และเรียกชื่อจุดกระทบนี้ว่า “Power point” ซึ่งถ้าความเร็วไม้แร็กเกตที่ต่ำอย่างเช่นการตีลูกโฟร์แฮนด์ (forehand shot) จุดพลังกระทบจุดนี้ จะอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ทำให้ไม่เกิดแรงสั่นสะเทือน (node point) ซึ่งอยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้ (Geometric String-bed Center; GSC) ประมาณ 28 มม. (0.028 เมตร) ขณะความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกตเท่ากับ 40.0 เรเดียนต่อวินาที ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) แต่ถ้าความเร็วไม้แร็กเกตสูงมากเช่นการเสิร์ฟลูกแรก (first serve) จุดพลังกระทบจุดนี้ น่าจะเคลื่อนที่ไปใกล้ปลายไม้แร็กเกตที่อยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้ประมาณ 50 มม. (0.050 เมตร) ในขณะที่ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของไม้แร็กเกต 50.9 เรเดียนต่อวินาที หรือความเร็วของไม้แร็กเกตประมาณ 36.8 เมตรต่อวินาที ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ซึ่งแตกต่างจากผลการวิจัยครั้งนี้ ที่จุดกระทบที่เกิดความเร็วลูกเทนนิสสูงสุด น่าจะอยู่เหนือจุดกลางหน้าไม้แร็กเกตประมาณ 30 มม. [ขณะที่ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกต เท่ากับ 49.9 เรเดียนต่อวินาที หรือมีความเร็วของหน้าไม้แร็กเกต ประมาณ 30.88 เมตรต่อวินาที] อย่างไรก็ตาม ซอพพิน (Choppin, 2013) ยังรายงานเพิ่มว่า ถ้าความเร็วไม้แร็กเกตสูงมากขึ้นไปอีก จุดพลังกระทบมีโอกาสที่จะเคลื่อนไปใกล้ปลายไม้แร็กเกตเหนือจุดกลางหน้าไม้ได้ถึงประมาณ 85 มม. (Ideal point)

ทั้งนี้ภายหลังจากทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การทำงานายของตัวแปรอิสระทั้งสี่ตัวแปรที่ทำนายตัวแปรตามนั้น พบอีกว่าค่ากำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณที่ปรับเทียบ (Adjusted  $R^2 = .898$ ) มีค่าเท่ากับ 89.8 ดังตารางที่ 10 มีค่าเท่ากับ 89.8 แสดงว่าโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายนี้ สามารถอธิบายและทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกถึง ร้อยละ 89.8 สอดคล้องกับ เอลลินและคณะ (Allen et al., 2010) ได้นำเสนอโมเดลที่สามารถคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากคอมพิวเตอร์ โดยแบ่งโมเดลของไม้แร็กเกตออกเป็นส่วนย่อย (finite element: FE model: Ansys/ LS-DYNA10.0) จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory study) พบว่าความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบ เท่ากับ  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  โมเดลที่ใช้ทำนาย จะมีความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย เท่ากับ  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  หรือคิดเป็น ร้อยละ 2.5 (โมเดลสามารถใช้ทำนายได้ถึง ร้อยละ 97.5) มีความสามารถทำนายได้สูงกว่าที่โมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายในการเสิร์ฟลูกแรกในการวิจัยครั้งนี้ (ร้อยละ 89.8) ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลจากปัจจัยตัวแปรอิสระที่เกิดจากองค์ประกอบด้านทักษะและเทคนิคในการเสิร์ฟลูกแรกใน ตัวนักกีฬาเป็นหลักคือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนเข้ากระทบลูกเทนนิส และค่าอัตราส่วนเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ (Smash ratio) โดยมีปัจจัยตัวแปรที่เกิดจากองค์ประกอบร่วมด้านคุณสมบัติเฉพาะทางของผลิตภัณฑ์ของไม้แร็กเกตได้แก่ ค่าความแข็งแรงของไม้แร็กเกต (Stiffness) และค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension) ส่วนค่าน้ำหนักของการกระจายแรงเหวี่ยงของไม้แร็กเกต (Swing weight) ซึ่งถูกขจัดหรือคัดออกจากสมการถดถอยไม่น่ามีผล หรือมีผลน้อยมากต่อการทำนายความเร็วลูกเสิร์ฟลูกแรก

สอดคล้องกับแมคคอร์ดี้ (MacCurdy, 2006; การกีฬาแห่งประเทศไทย, 2547) กล่าวว่า องค์ประกอบหลักของตัวบ่งชี้ถึงการเป็นนักเทนนิสชั้นเยี่ยมที่มีความสามารถพิเศษนั้น แบ่งออกเป็น 6 ประเภท นอกจาก องค์ประกอบด้านสรีรวิทยา (Physiological Factors) องค์ประกอบด้านร่างกาย (Physical Factors) โดยผู้เล่นที่มีข้อได้เปรียบทางร่างกายจะมีโอกาสที่ดีกว่าในการที่จะถูกเลือกในช่วงอายุระหว่าง 10-12 ปี และต่ำกว่าองค์ประกอบด้านประสบการณ์การเล่นทักษะด้านเทคนิคการเล่น และการเจริญเติบโตทางชีววิทยา คือ ส่วนสำคัญที่มีผลต่อผลการเล่น เมื่อผู้เล่นมีอายุระหว่าง 13-14 ปี ความสามารถทางกลไกเฉพาะในกีฬาเทนนิส โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเร็วของเวลาปฏิกิริยา (reaction speed) และความคล่องแคล่วว่องไว กลายเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในด้านความสามารถของผู้เล่น จากนั้นเมื่อผู้เล่นมีอายุประมาณ 16 ปี (โดยปกติผู้หญิงจะต่ำกว่า 16 ปี) องค์ประกอบด้านความแข็งแรง กำลัง นอกจากนั้นความเร็วและความอดทนแบบแอนแอโรบิกจะทำหน้าที่ในการเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับสมรรถนะของผู้เล่น รวมถึงองค์ประกอบด้านเทคนิคและแทคติก (Technical/Tactical Factors) คุณลักษณะด้านเทคนิคและแทคติกของตัวบ่งชี้ผู้มีความสามารถพิเศษอาจจะเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมาก แต่ผู้ฝึกสอนจะต้องมีเครื่องมือในการประเมินที่ดีด้วย ในระยะเริ่มต้น (อายุประมาณ 7-10 ปี) เด็กควรอยู่ในระดับที่อยู่ในเกณฑ์เฉลี่ยในด้านการถือบอลและการถือไม้ เมื่อเด็กมีอายุประมาณ 12 ปี ควรมีการพิจารณาทักษะพื้นฐาน เช่น การเสิร์ฟ การตีโฟร์แฮนด์ การตีแบ็คแฮนด์ การวอลเลย์ และการตบลูกเมื่อผู้เล่นเติบโตขึ้นมาถึงระดับเยาวชน การรักษาทักษะพื้นฐานให้คงอยู่ระหว่างการแข่งขันในช่วงคะแนนที่มีความสำคัญ โดยผู้เล่นควรเพิ่มแรงในการตีลูกบอลในแต่ละครั้งตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการแข่งขัน เมื่อผู้เล่นเติบโตเต็มที่ ลูกเสิร์ฟและการตีโฟร์แฮนด์ จะเป็นสิ่งสำคัญของความสามารถในการเล่นระดับสูงต่อไปผู้เล่นในระดับเยาวชนควรมีความสามารถในการฟุตเวิร์ค (footwork) ดีพอควรและความสามารถในการปรับเปลี่ยนแผนการเล่น เมื่อมีความแตกต่างของสถานการณ์ขณะทำการเล่น การเลือกใช้แทคติกในแต่ละสถานการณ์ในขณะแข่งขันและการตัดสินใจที่ดี โดยให้สัดส่วนคะแนนของตัวบ่งชี้การเป็นนักเทนนิสที่มีความสามารถพิเศษรุ่นอายุ 12 ปี ในด้านเทคนิคและแทคติกถึงร้อยละ 30 มากที่สุด ส่วนในด้านร่างกาย ด้านจิตวิทยา และด้านที่ไม่สามารถจับต้องได้ใกล้เคียงกับด้านสรีรวิทยา คิดเป็น ร้อยละ 25, 20 และ 10 เรียงตามลำดับ โดยมีปัจจัยด้านอื่นๆ รวมกันร้อยละ 15

สรุปผลการวิจัย การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิส ที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติจากการทดสอบการเสิร์ฟลูกด้วยเครื่องทดสอบ และการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสเยาวชนชายทีมชาติ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ศึกษาถึงอัตราเร่งและความเร็วของลูกเทนนิสที่เกิดจากการเสิร์ฟลูกแฟลท์ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการ โดยไม่เร้ากเกิดขึ้นนำจากต่างประเทศรวม 3 รูปแบบโครงสร้าง โดยกำหนดระดับ



ความเร็วของไม้แร็กเกตที่ระดับสูง (ความเร็วรอบมอเตอร์ เท่ากับ 450 rpm) ใกล้เคียงกับความเร็วของไม้แร็กเกตก่อนกระทบในการแข่งขันระดับนานาชาติ เลือกลูกเทนนิสที่กระทบตรงตำแหน่งที่ต้องการ แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวของลูกและไม้แร็กเกตแบบต่อเนื่องแบบ 3 มิติ ส่วนในขั้นตอนที่ 2 ศึกษาโมเดลเพื่อทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้ จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (Smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นตอนที่ 1 มาประกอบรวมในสมการ เนื่องจากเป็นข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการเสิร์ฟของนักกีฬา ซึ่งเป็นการศึกษาโมเดลที่ได้จากประสบการณ์ในสภาวะที่เกิดขึ้นจริง (Empirical model) โมเดลดังกล่าวนี้ จึงสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์และอธิบายเหตุการณ์ต่างๆได้โดยตรง

พบว่าผลการวิจัยในขั้นตอนที่ 1.1 ในรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR สรุปผลการศึกษาความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกตจากรูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์แรกคือ RR ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบใน พบว่าค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสหลังกระทบต่อความเร็วของไม้ก่อนกระทบ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ไม้แร็กเกต RR ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่าสูงที่สุด ( $1.444 \pm 0.012$ ) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ โดยค่าอัตราส่วนรองลงมาคือ จุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ซึ่งใกล้เคียงกับจุดกระทบที่ 4 ได้จุดกลางหน้าไม้ 30 มม. (0, -30) และจุดกระทบที่ 5 เยื้องออกจากจุดกลางไปทางขวา (30, 0) โดยค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้จุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. มีค่าน้อยที่สุด โดยค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้แร็กเกต (Smash ratio) ณ จุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 30 มม. มีค่ามากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) ร้อยละ 2.049 ซึ่งน่าจะเป็นจุดกระทบที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ ขณะความเร็วของหน้าไม้แร็กเกตก่อนกระทบลูกเทนนิสเฉลี่ย 30.84 เมตรต่อวินาที หรือมีความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของไม้แร็กเกต เท่ากับ 49.98 เรเดียนต่อวินาที

ผลการวิจัยในสามรูปแบบโครงสร้างคือ RR (สี่เหลี่ยม), RT (สามเหลี่ยม) และ RO (วงรี) จากขั้นตอนที่ 1.2 ซึ่งเป็นการศึกษาความแตกต่างของความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบหน้าไม้แร็กเกต 3 รูปแบบโครงสร้าง ด้วยการจำลองการเสิร์ฟลูกแฟลท์โดยตรงจากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วของไม้ ( $Ball_{post}/Racket_{pre}$ ) ของจุดกระทบที่ 2 เหนือจุดกลาง 30 มม. (0, 30) ของไม้แร็กเกตโครงสร้างทั้งสาม (3R) มีค่ามากที่สุด และมากกว่าตำแหน่งจุดกระทบที่ 3 จุดกลางหน้าไม้แร็กเกต (GSC) เฉลี่ยร้อยละ 1.811 เช่นกัน และจุดกระทบที่ 1 เหนือจุดกลางหน้าไม้ 60 มม. (0, 60) ยังคงมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.880 ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าอัตราส่วน ในสาม

รูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตและจุดกระทบทั้งห้า พบว่า ค่าอัตราส่วนความเร็วของลูกเทนนิสต่อความเร็วไม้แร็กเกต (Smash ratio) ของสามรูปแบบโครงสร้าง ณ จุดกระทบที่ 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างจากตำแหน่งจุดกระทบที่เหลือ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$  แสดงว่า ค่าอัตราส่วนเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งจุดกระทบ น่าจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรก อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าอัตราส่วนนี้ระหว่างโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ แสดงถึงโครงสร้างไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ ไม่น่าจะมีความแตกต่างกันต่อผลประสิทธิภาพในการเสิร์ฟลูกแรก

ส่วนในขั้นตอนที่สอง เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกจากนักกีฬา สรุปลผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอิสระ 5 ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิจัย จากการวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ จากการเสิร์ฟลูกแรกในนักกีฬาเยาวชนทีมชาติ โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตที่เป็นตัวแทนในแต่ละรูปแบบโครงสร้างหน้าไม้แร็กเกตทั้งสามรูปแบบ เลือกลูกเสิร์ฟที่ดีและอยู่ตรงตามตำแหน่งจุดกระทบๆละไม่เกิน 5 ผลการทดสอบ มาวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ รวมทั้งสิ้น 167 ผลวิเคราะห์ภาพ ( $n^{\#}$ ) เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอยใช้ในการทำนายความเร็วของลูกเทนนิส ในการเสิร์ฟลูกแรก พบว่าค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ (Ball Velocity<sub>post</sub>) ที่เพิ่มขึ้นนั้น เกิดจากตัวแปรอิสระตัวแปรแรกคือ ค่าความเร็วไม้แร็กเกตก่อนกระทบ (Racket Velocity<sub>pre</sub>) ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่ทำนายทางบวก ต่อค่าความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิสหลังกระทบ มีอิทธิพล หรือผลมากที่สุดถึงร้อยละ 76.2 ( $\beta = .762$ ) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ  $p < 0.05$  โดยตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลูกแรก รองลงมาคือ อัตราส่วนความเร็วลูกเทนนิสต่อไม้แร็กเกต (Smash ratio) ซึ่งทำให้ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 67.1 ( $\beta = .671$ ) ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพล รองลงอีกคือค่าความแข็งแรงแรงของไม้แร็กเกต (Racket<sub>stiffness</sub>) ทำให้ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 56.4 ( $\beta = .564$ ) ทั้งนี้ความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกต (String tension) มีอิทธิพล หรือผลในทางตรงกันข้าม ทำให้มีค่าความเร็วลูกเทนนิสในการเสิร์ฟลดลง ร้อยละ 32.9 ( $\beta = -.329$ ) แสดงว่า ค่าความตึงเอ็นบนหน้าไม้แร็กเกตลดลงในช่วงที่เหมาะสม ช่วยทำให้ความเร็วลูกเทนนิสเพิ่มขึ้น ยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย สามารถทำนายตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระสี่ตัวแปร ร้อยละ 89.8 (Adjusted  $R^2 = .898$ ) ดังสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนายความเร็วในการเสิร์ฟลูกแรก [predictive impact model; Ball Velocity<sub>post</sub> = -25.978 + .970 (Racket Velocity<sub>pre</sub>) + 86.223 (Smash ratio) + .270 (Racket<sub>stiffness</sub>) - .840 (String tension)] น่าจะนำมาใช้เป็นประโยชน์ เพื่ออธิบายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรกได้ในระดับดี ใกล้เคียงค่าความเป็นจริงประมาณร้อยละ 89

### ข้อจำกัดในการวิจัย

1. ในการศึกษาโมเดลเพื่อใช้ในการทำนายความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ในแต่ละตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิด ใช้ตัวแปรอิสระที่ได้มาตรฐาน (Smash ratio) จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นตอนที่ 1 มาประกอบร่วมในการสร้างโมเดลสมการถดถอยที่ใช้ทำนาย ความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแรก (predictive impact model) เนื่องจากเป็นข้อจำกัดไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการเสิร์ฟของนักกีฬา

2. มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้แรกเกิด จากวิดีโอภาพการเคลื่อนไหวต่อเนื่องแบบ 3 มิติ ในสนามเทนนิส เนื่องจากมีความลำบากมากกว่าในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ในการวิจัยได้ใช้ปากกาสีชนิดพิเศษแถม (marker) บริเวณเอ็นบนหน้าไม้ในแต่ละตำแหน่ง รวมถึงมีการติดตัวสะท้อนแสงชนิดแถบเทปที่ขอบหน้าไม้แรกเกิดด้วย

### ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

ในงานวิจัยโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุด ในการเสิร์ฟลูกแฟลท์ เป็นงานวิจัยที่สำคัญ และยังไม่มียุทธศาสตร์ที่สามารถครอบคลุมในทุกประเด็นปัญหา งานวิจัยครั้งนี้เป็นองค์ประกอบหนึ่ง ที่ช่วยเติมเต็มงานวิจัยเกี่ยวกับการเสิร์ฟแรกในกีฬาเทนนิส ทั้งนี้ผู้สนใจงานวิจัย อาจจะทำวิจัยในเรื่องต่างๆดังนี้

1. ควรมีการศึกษาวินัยอัตราเร่งและความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ณ ตำแหน่งจุดกระทบที่ต่างกันบนหน้าไม้แรกเกิด ในขณะที่ไม้แรกเกิดมีความเร็วที่ต่างกันไป ด้วยเครื่องทดสอบ และในตวันนักกีฬาเพิ่มมากยิ่งขึ้น รวมถึงศึกษาลักษณะการเคลื่อนไหวการเสิร์ฟลูกแรกของนักเทนนิสทีมชาติที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการเสิร์ฟสูงสุด ในขณะที่แข่งขันกีฬาเทนนิสระดับชาติและนานาชาติ ต่อไป

2. ควรมีการวิจัยเปรียบเทียบเกี่ยวกับคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไม้แรกเกิดที่แตกต่างกันรวมถึงผลิตภัณฑ์เส้นเอ็นที่ใช้ และผลิตภัณฑ์ลูกเทนนิส ที่มีผลต่อความเร็วสูงสุดของลูกเทนนิส ทั้งในห้องปฏิบัติการ และในการเสิร์ฟลูกของนักกีฬา เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกีฬาเทนนิสต่อไป

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

การกีฬาแห่งประเทศไทย. (2547). วิทยาศาสตร์การกีฬาสำหรับกีฬาเทนนิส: กองวิทยาศาสตร์การกีฬา ฝ่ายวิทยาศาสตร์การกีฬา การกีฬาแห่งประเทศไทย.

เฉลิม ชัยวัชราภรณ์, ชัยสิทธิ์ ภาวิลาส, ชัยพัฒน์ หล่อศิริรัตน์, วีรพัฒน์ ยอดกมลศาสตร์, ธงทอง ทรงสุภาพ และสุกิจ พิทักษ์เจริญ. (2555). การศึกษาอัตราเร่งและความเร็วสูงสุดของ ลูกเทนนิส ณ ตำแหน่งจุดกระทบที่ต่างกันบนหน้าไม้แรกเกิดขณะเสิร์ฟด้วยเครื่องทดสอบ และตำแหน่งจุดกระทบจากการเสิร์ฟของนักเทนนิสเยาวชนทีมชาติ. รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: การกีฬาแห่งประเทศไทยร่วมกับคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

ชัยสิทธิ์ ภาวิลาส, เฉลิม ชัยวัชราภรณ์, บุญศักดิ์ หล่อพิพัฒน์, ถนอมศักดิ์ เสนาคำ และชูศักดิ์ พัฒนะ มนตรี. (2544). การวิเคราะห์ความเร็วลูกและความแม่นยำในการเสิร์ฟของนักเซปักตะกร้อ หญิงทีมชาติ.

ถนอมวงศ์ กฤษณ์เพ็ชร์, รัชณี ขวัญบุญจัน, ศิลปชัย สุวรรณธาดา, สมชาย ประเสริฐศิริพันธ์, สุวัตร สิทธิหล่อ, ชัยพัฒน์ หล่อศิริรัตน์, บุญศักดิ์ หล่อพิพัฒน์ และชัยสิทธิ์ ภาวิลาส. (2552). การศึกษาปัจจัยความสำเร็จของชนิดกีฬาที่เป็นความหวังของประเทศไทย ประจำปี 2551. รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: การกีฬาแห่งประเทศไทยร่วมกับสำนักกีฬาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาสกร วัฒนธาดา, ปาจริย์ ศรีสมบัติ, สมพล สงวนรังศิริกุล และสุวัตร สิทธิหล่อ. (2548). ความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราเร็วของลูกเสิร์ฟกับระดับความสูงบริเวณหน้าไม้แรกเกิดที่กระทบกับลูกเทนนิส.

ศิลปชัย สุวรรณธาดา. (2552). การศึกษาปัจจัยความสำเร็จของชนิดกีฬาที่เป็นความหวังของประเทศไทย ในกีฬาเทนนิส: รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: การกีฬาแห่งประเทศไทยร่วมกับสำนักกีฬา วิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาษาอังกฤษ

Allen T, Haake SJ and Goodwill S. (2010). Comparison of a finite element model of a tennis racket to experimental data *J Sports Eng.*, 12, 87-98.

- Allen T, Haake SJ and Goodwill S. (2011). Effect of tennis racket parameters on simulated groundstroke. *J Sports Sci.*, 29(3), 311-325.
- Brody H. (2002). Power racquet technology and strokes. How equipment has changed the game. In Howard B, Cross R & Lindsey C (Eds.), *The physics and technology of Tennis*. Solana Beach racquet tech USRSA, 183-192.
- Brody H and Cross R. (2002). Serve speed. Theory, motion and strategy. In Howard B, Cross R and Lindsey C (Eds.), *The physics and technology of Tennis*. Solana Beach racquet tech USRSA, 201-207.
- Brody H and Cross R. (2002). String tension effects on tennis ball rebound speed and accuracy during playing conditions. *J Sports Sci*, 23(7), 765-771.
- Brody H, Cross R and Lindsey C. (2006). The Physics and Technology of Tennis. available from [www.racquettech.com](http://www.racquettech.com).
- Casolo F and Ruggieri G. (1991). Dynamic analysis of the ball-racket impact the game of tennis *Meccanica*, 26, 67-73
- Choppin SB. (2008). *Modeling of tennis racket impacts in 3D using elite players*. (Ph.D. thesis), The University of Sheffield.
- Choppin SB. (2013). An investigation into the power point in tennis. *J Sports Eng*, 16, 173-180.
- Choppin SB, Goodwill S and Haake SJ. (2011). Impact characteristics of the ball and racket during play at the Wimbledon Qualifying tournament. *J Sports Eng*, 13, 163-170.
- Chow J, Carton L, Lim YT, Chae WS, Shim JH, Kuenster A and Kokubum K. (2003). Comparing the pre- and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis player' first and second serves: a preliminary study. *J. Sports Sci.*, 21(1), 529-537.

- Cohen AB, Tenenbaum G and English RW. (2006). Emotions and golf performance: An IZOF-based applied sport psychology case study. *Behavior Modification*, 30, 259-280.
- Cross R. (1998). The sweet spots of a tennis racquet. *J Sports Eng*, 1, 63-78.
- Cross R. (2006). Tennis Racquet Physics, University of Sydney. Retrieved Last accessed on March 17, 2006 from <http://www.physics.usyd.edu.au/~cross/tennis.html>
- Cross R and 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.
- Donoghue PO and 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.
- Gale G. (1971). Optimal strategy for serving in tennis. *Mathematics Magazine*, 44(4), 197-199.
- Glynn JA, King MA and Mitchell SR. (2010). A computer simulation model of tennis racket/ball impacts. *J Sports Eng*, 13, 65-72.
- Goodwill SR and Haake SJ. (2003). Effect of string tension on the impact between a tennis ball and racket *The engineering of sport 5*, Davis California, 3-9.
- Gu YD and Li JS. (2007). Dynamic simulation of tennis racket and string. *International Journal of Sports Science and Engineering*, 1(1), 55-60.
- Haake SJ, Allen T, Choppin SB and Goodwill S. (2007). *The evolution of tennis racket and its effects on serve speed*. In MillerS & Capel-DaviesJ (eds). *Tennis Science and Technology 3*. Paper presented at the III International Conference on Tennis Science and Technology, London.

- Hatze H. (1994). Impact probability distribution, sweet spot, and the concept of an effective power region in tennis rackets. *J Appl. Biomech*, 10, 43-50.
- Head H. (1976) Tennis racket, December 28, US Patent 3,997,756.
- ITF TECHNICAL DEPARTMENT. (2009). Retrieved Last accessed on March 01, 2009 from [www.itftennis.com/technical](http://www.itftennis.com/technical)
- MacCurdy D. (2006). Talent Identification around the world and Recommendations for the Chinese Tennis Association. Retrieved last accessed on May 19, 2006 from [www.itftennis.com/shared/medialibrary/pdf/original](http://www.itftennis.com/shared/medialibrary/pdf/original)
- Maeda H, Okauchi M and Shimada Y. (2000). *A model for analysis of impact between a tennis racket and a ball*. Paper presented at the ISBS-conference proceedings, 18 International symposiums on biomechanics in sports.
- Mitchell SR, Jones R and King M. (2000). Head speed versus racket inertia in the tennis serve. *J Sports Eng*, 3(2), 99-110.
- Murias JM, Micallef JP and Millet GP. (2007). Metabolic and functional responses playing tennis on different surfaces. *J Strength Cond Res*, 21(1), 112-117.
- Nevill A, Atkinson G and Hughes MC. (2008). Twenty-five years of sport performance research in the Journal of Sports Sciences. *J Sports Sci*, 26(4), 413-426.
- Silvestre R, West C, Maresh CM and Kraemer WJ. (2006). Body composition and physical performance. *J Strength Cond Res*, 20(1), 177-183.
- Trabert T and Hook J. (1984). *The Serve: Key to Winning Tennis*. New York: Dodd, Mead & Co.
- White C. (2011). *Projectile dynamics in sports: Principles and application*. Routledge.
- Williams AM and Reilly T. (2000). Talent identification and development in soccer. *J Sports Sci*, 18(9), 657-667.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1) แบบตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ 3 มิติ จากไม้แร็กเกตอันแรกของนักกีฬา Subject-RR1 ในแต่ละตำแหน่ง

position	center	Km/hr	position	Above	Km/hr
file	29		file	32	
	ball			ball	
peak velocity	55.883	201.1788	peak velocity	55.309	199.1124
	Racket			Racket	
head	49.869	179.5284	head	50.952	183.4272
shoulder	30.255	108.918	shoulder	29.08	104.688
center	40.062	144.2232	center	40.016	144.0576
ratio	1.394912885	1.394913	ratio	1.382172131	1.382172
position	Half above	Km/hr	position	Right	Km/hr
file	68		file	17	
	ball			ball	
peak velocity	54.819	197.3484	peak velocity	54.789	197.2404
	Racket			Racket	
head	47.95	172.62	head	49.247	177.2892
shoulder	28.36	102.096	shoulder	29.246	105.2856
center	38.155	137.358	center	39.2465	141.2874
ratio	1.436744857	1.436745	ratio	1.396022575	1.396023

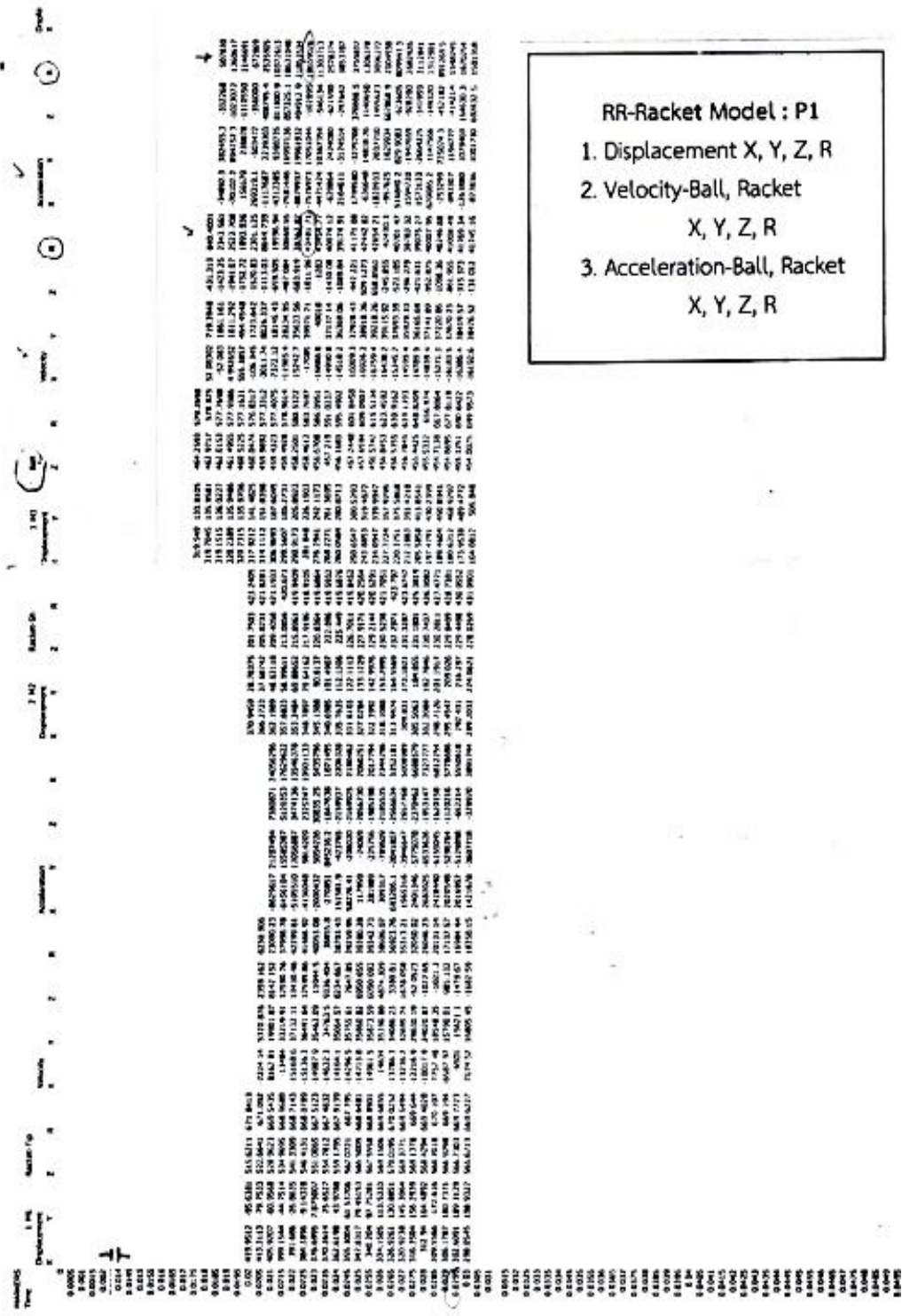


- 2) ตัวอย่างตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ จากไม้แร็กเกตอันแรกของนักกีฬาจำนวน 6 คน (RR1, RR2, RT1, RT2, RO1, RO2) และเป็นข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ทางสถิติ (SPSS/PC) ในรอบแรก

data tennis model-167(round-1)\_1.sav

	Racket	Posit	BallSpeed	RacSpeed	StringTens	RacStiffness	RacSW	SmashRatio	
1	1.0	3	201.2	144.2	49.0	63.0	317.0	1.415	Sub-RR-1
2	1.0	2	197.3	137.3	48.0	63.0	317.0	1.444	
3	1.0	1	199.1	144.0	49.0	63.0	317.0	1.406	
4	1.0	5	197.2	141.3	49.0	63.0	317.0	1.412	
5	1.0	3	189.1	136.5	54.0	67.0	305.0	1.415	
6	1.0	2	184.9	129.8	54.0	67.0	305.0	1.444	RR-1
7	1.0	1	179.5	129.5	52.0	67.0	305.0	1.406	
8	1.0	4	183.3	132.2	53.0	67.0	305.0	1.412	RR-1
9	1.0	5	180.7	130.6	54.0	67.0	305.0	1.413	
10	2.0	1	199.5	143.9	52.0	50.0	315.0	1.416	RT-1
11	2.0	2	188.2	129.3	50.0	50.0	315.0	1.475	
12	2.0	3	181.1	129.4	52.0	50.0	315.0	1.442	
13	2.0	4	198.4	139.2	51.0	50.0	315.0	1.445	
14	2.0	5	179.4	126.6	50.0	50.0	315.0	1.437	
15	2.0	1	185.1	134.5	50.0	52.0	323.0	1.416	RT-2
16	2.0	2	180.9	125.2	49.0	52.0	323.0	1.475	
17	2.0	3	179.8	127.3	50.0	52.0	323.0	1.442	
18	2.0	5	176.6	125.6	48.0	52.0	323.0	1.437	
19	3.0	1	241.1	157.3	47.0	66.0	315.0	1.404	RO-1
20	3.0	2	241.0	155.6	46.0	66.0	315.0	1.472	
21	3.0	3	225.5	149.0	46.0	66.0	315.0	1.452	
22	3.0	5	213.5	143.2	47.0	66.0	315.0	1.449	
23	3.0	1	191.4	140.3	53.0	63.0	327.0	1.404	
24	3.0	2	189.3	132.2	52.0	63.0	327.0	1.472	RO-2
25	3.0	3	185.5	131.4	52.0	63.0	327.0	1.452	
26	3.0	5	184.4	130.8	53.0	63.0	327.0	1.449	

3) ตัวอย่างข้อมูลดิบผลการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ 3 มิติจากไม้แร็กเกตรูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยม RR ตำแหน่งจุดกระทบที่ 1



## ภาคผนวก ข

1) รูปแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตและลูกเทนนิส/รูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดลองวิจัย

การจำแนกรูปแบบโครงสร้างไม้แร็กเกตชั้นนำจากต่างประเทศ ที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดลองวิจัย แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบโครงสร้างหลัก คือ รูปแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแนวตั้ง (RR: Rectangular Racket), สามเหลี่ยมหัวกลับ มีขนาดด้านกว้างข้างบนมากกว่าข้างล่าง (RT: Triangular Racket) และวงรี มีรูปร่างคล้ายไข่ (RO: Oval Racket) โดยโครงสร้างหน้าไม้ของทั้งสามรูปแบบโครงสร้าง มีลักษณะที่แตกต่างกันไป แต่มีหน้าไม้ด้านซ้าย-ขวา สมดุลกัน (symmetry) เป็นไปตามแต่ละผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกต ดังนี้

RR: Yonex VCORE 95D  
(Rectangular Racket)

RT: Prince EXO3 Tour 100  
(Triangular Racket)

RO: Babolat Pure Storm GT  
(Oval Racket)



## 2) คุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์

แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ไม้แร็กเกตตามโครงสร้างสี่เหลี่ยม (RR) และเป็นไม้รุ่นเดียวกันอันใหม่ที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาติใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขันระดับนานาชาติ แหล่งข้อมูลมาตรฐานเทียบตาม Babolat Racket Diagnostic Center (RDC Unit), ยกเว้นขนาดความกว้างและยาวของหน้าไม้ (*racket head size in width by length*)

Technical specification								
Model	Composition	Length (cm.)	Strung weight (g.)	Head size (sq. in.)	Head size in width x length (cm.)	Swing weight (kg.cm <sup>2</sup> )	Stiffness (Hz)	Balance (pts HL)
RR : Yonex VCORE 95D	Graphite X-Fullerene	68.58	337.36	95	25.5x34.0	317	63	7

The Geometric String-bed Center (GSC) of RR racket is 17.0 cm away from top or bottom in long axis of racket head.

แสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ทั้งสามรูปแบบโครงสร้างคือสี่เหลี่ยม (RR), สามเหลี่ยม (RT) และวงรี (RO) ซึ่งเป็นไม้รุ่นเดียวกันอันใหม่ที่นักเทนนิสเยาวชนทีมชาติใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขันระดับนานาชาติ แหล่งข้อมูลมาตรฐานเทียบตาม RDC Unit (Babolat Racket Diagnostic Center)

Technical specification							
Model	Composition	Length (cm.)	Strung weight (g.)	Head size (sq. in.)	Swing weight (kg.cm <sup>2</sup> )	Stiffness (Hz)	Balance (pts HL)
RR : Rectangular Racket	Graphite X-Fullerene	68.58	337.36	95	317	63	7
RT : Triangular Racket	Graphite Ex03tour100	68.58	328.85	100	323	52	7
RO : Oval Racket	Graphite Tungsten	68.58	312.00	98	327	63	1

- 3) การติดตั้งชุดเครื่องมือวิเคราะห์ภาพการเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ ณ สนามกีฬาเทนนิส คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การติดตั้งชุดเครื่องมือ



การปรับเทียบมาตรฐานก่อนการทดสอบ



การปรับเทียบมาตรฐานก่อนการทดสอบ



Tracking data



การเติมตำแหน่งจุดกระทบที่ 2) land marker) บนเอ็นหน้าไม้แร็กเกตด้านหลัง



String tension measurement, Gosen TM-880, Japan

#### 4) เครื่องวัดคุณสมบัติในการกระเด็นของลูกเทนนิส



CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวัดคุณสมบัติในการกระเด็นลูกเทนนิส (Tennis ball bouncing) ตามข้อกำหนดทางเทคนิคของสหพันธ์เทนนิสนานาชาติ (International Tennis Federation: ITF) และลูกเทนนิสผลิตภัณฑ์ Wilson US Open ที่ใช้ในรายการศึกษาวิจัย


ภาคผนวก ค


1) เอกสารประกอบการขออนุมัติโครงการวิจัยและขอจริยธรรมการวิจัย


**แบบเสนอขออนุมัติโครงการวิทยานิพนธ์** บ.ค.4  
**คณะกรรมการบริหารคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา**  
**คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ใช้ตัวพิมพ์เท่านั้น)**


ชื่อ (นามานามสกุล)..... ชัยสิทธิ์ ภาวิธาส..... รหัสนิสิต 5 4 7 8 6 0 3 1 3 9  
 นิสิตแขนงวิชา..... วิทยาศาสตร์ในสาขาคณิตศาสตร์..... วิทยานิพนธ์..... 36..... หน่วยกิต  
 เข้ารับใบสมัครศึกษาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์  ดิน  ป่าขอ ปริญญา..... 2554.....  
 ที่อยู่ติดต่อสะดวก 100/502 หมู่บ้านชัยพฤกษ์ ต.บ้านดง อ.ลาดบัวหลวง จ.สุพรรณบุรี 10520 โทรศัพท์ 02-9148891  
 มีชื่อ..... 089-1168919..... E-MAIL..... ctwiseth.pa@gmail.com.....  
 มีความประสงค์ขออนุมัติโครงการวิทยานิพนธ์ เพื่อดำเนินการต่อไป  
 หัวข้อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย..... การศึกษาโมเดลค่าแรงจูงใจระบบเน้นหน้าไม้เทนนิสที่ก่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในการ  
 เล็งที่ลูกเทนนิสที่วิ่งเคลื่อนที่บนสนาม 3 มิติ ของนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ  
 หัวข้อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ (พิมพ์ตัวพิมพ์ใหญ่ทุกตัว)..... A STUDY ON IMPACT MODEL OF TENNIS FLAT SERVE  
 AT RACKET'S MAXIMUM BALL SPEED SPOI IN 3D USING NATIONAL YOUTH MALE PLAYERS.....  
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจดิม ชัยวีระภรณ์..... โทรศัพท์..... 087-8073113.....  
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภนัย สุวรรณธาดา..... โทรศัพท์..... 081-8444902.....  
 และได้แนบโครงการวิจัย จำนวน..... 5..... ชุด มาด้วย  
 ทั้งนี้มีมติอนุมัติจากที่ประชุมคณะกรรมการบริหารหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ครั้งที่..... 82556..... วันที่..... 17 มี.ค. 56.....  
 โดยแต่งตั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดังมีรายชื่อนามต่อไปนี้

..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจดิม ชัยวีระภรณ์.....	ประธานกรรมการ
..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจดิม ชัยวีระภรณ์.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภนัย สุวรรณธาดา.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจดิม ชัยวีระภรณ์.....	กรรมการ
..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจดิม ชัยวีระภรณ์.....	กรรมการ
..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศาสรี เมืองไทย.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย


ลงชื่อ..... ..... นิสิต  
 ( นายชัยสิทธิ์ ภาวิธาส )  
 12 / 1 / 2556.....

ลงชื่อ..... ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจดิม ชัยวีระภรณ์ )  
 12 / 1 / 2556.....

ลงชื่อ..... .....  
 ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจดิม ชัยวีระภรณ์ )  
 ประธานสาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา  
 12 / 1 / 2556.....

ลงชื่อ..... .....  
 ( รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภนัย สุวรรณธาดา )  
 เลขานุการคณะกรรมการบริหารหลักสูตรฯ  
 12 / 1 / 2556.....

มติจากที่ประชุมคณะกรรมการบริหารคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา ครั้งที่..... 82556..... วันที่..... 14 มี.ค. 56.....  
 ขอนุมัติ โดยไม่ทำไร  
 ขอนุมัติ โดยมีเงื่อนไขดังนี้ ในข้อ 9 เปลี่ยนภาพปกปกหน้าปกหลัง

ลงชื่อ..... .....  
 ( รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภนัย )  
 เลขานุการคณะกรรมการบริหารคณะฯ



## ๒.๒

เอกสารประกอบการประชุมคณะกรรมการบริหารคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา

ครั้งที่ ๗/๒๕๕๖

วันจันทร์ที่ ๒๔ กรกฎาคม ๒๕๕๖

ระเบียบวาระการประชุมที่ ๒ เรื่องสืบเนื่อง

- ๒.๒ ขอความเห็นชอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ของนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา  
หลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬา  
ประจำปีการศึกษา ๒๕๕๖

สาระสำคัญ

ตามที่ประชุมคณะกรรมการบริหารคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา ครั้งที่ ๖/๒๕๕๖ เมื่อวันที่ ๒๔ มิถุนายน ๒๕๕๖ มีมติให้นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส นิสิตแขนงวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬาและเทคโนโลยีการกีฬา นำโครงร่างวิทยานิพนธ์กลับไปแก้ไขให้ครบถ้วนตามมติคณะกรรมการบริหารหลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬา ครั้งที่ ๘/๒๕๕๖ เมื่อวันที่ ๑๗ มิถุนายน ๒๕๕๖ นั้น

ในการนี้ หน่วยจัดการศึกษา งานวิชาการและวิจัย จึงเสนอขอความเห็นชอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ของ นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส นิสิตแขนงวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬาและเทคโนโลยีการกีฬา รายละเอียดดังเอกสารประกอบการประชุม

ประเด็นที่ขอ

ขอเสนอที่ประชุมคณะกรรมการบริหารคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา เพื่อโปรดพิจารณาให้ความเห็นชอบตามระเบียบฯ ก่อนดำเนินการต่อไป

มติที่ประชุม

เห็นชอบ โดยเสนอแนะให้นำเรียนคณาจารย์ที่รับผิดชอบวิทยานิพนธ์ต่อไป  
 ๒๕๕๖ ๕



บันทึกข้อความ

4104  
2557.9.21

ส่วนงาน คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร. 81027  
ที่ ศบ 0512.24 /พิเศษ วันที่ 28 ตุลาคม 2557  
เรื่อง ขอบความอนุเคราะห์ยืมเครื่องมือเพื่อใช้ในการศึกษางานวิจัย

เรียน ศณบดี ผ่านรองศณบดี (รองศาสตราจารย์ ดร.ศรุตวรรณ สุขสม)

ด้วย นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส นิสิตระดับคุณวุฒิบัณฑิตศึกษา ชั้นปีที่ ๕ แผนกวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการศึกษางานวิจัยเรื่อง "การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระดูกบนเอ็นหน้าไม้นอนนิตที่ก่อให้เกิดความเร็วสูงสุดในการสิร์ฟลูกแฟล็กด้วยเครื่องทดสอบแบบสามมิติจากนักกีฬาชายชายทีมชาติ" ภายใต้การควบคุมโดยผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม ชัยวิชารามณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิลาชัย สุวรรณธาดา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นั้น

ในการนี้ เพื่อให้การศึกษางานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จึงขอความอนุเคราะห์ยืมเครื่องมือเพื่อใช้ในการศึกษางานวิจัย ได้แก่ ชุดวิเคราะห์การเคลื่อนไหว (DMAS Motion Analysis System) พร้อมกล้องตรวจวัดความเร็วสูง (High Speed Camera 2,000 Hz) จำนวน 2 ตัว ในระหว่างวันที่ 3 พฤศจิกายน 2557 ถึงวันที่ 26 มกราคม 2558 (ทุกวันจันทร์) ทั้งนี้ หากเครื่องมือเกิดการชำรุดเสียหาย ผู้วิจัยยินดีขอรับผิดชอบค่าเสียหายที่เกิดขึ้นตามความเป็นจริง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์ด้วย จักเป็นพระคุณยิ่ง

(นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส)

ผู้วิจัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม ชัยวิชารามณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศณบดี อำนวยความสะดวก (ศบ. ดร.ศรุตวรรณ สุขสม)  
เรียน ศณบดี  
เรียน ดร. พิชัยศักดิ์ วัฒนกุล

พญวณชญากร ว.พ.  
30.9.57



### บันทึกข้อความ

ส่วนงาน คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 โทร.0-2218-8147

ที่ ขว 741 /56

วันที่ 28 ตุลาคม 2556

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาจริยธรรมการวิจัย

เรียน คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา

- สิ่งที่ส่งมาด้วย
1. ใบรับรองผลการพิจารณา
  2. เอกสารข้อมูลสำหรับผู้มีส่วนร่วมในการวิจัย
  3. หนังสือแสดงความยินยอม
  4. แบบสอบถาม

ตามที่ นายชัชฉิทธิ ภาวีลาช นิสิตระดับอุดมศึกษาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เสนอโครงการวิจัยที่ 119.1/56 เรื่อง การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้เทนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดในการสิร์ฟฟลูคเพื่อใช้ด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ จากนักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ (A STUDY ON IMPACT MODEL OF TENNIS FLAT SERVE AT RACKET'S MAXIMUM BALL SPEED SPOT IN 3D USING NATIONAL YOUTH MALE PLAYERS) เพื่อให้กรรมการผู้ทบทวนหลักพิจารณาจริยธรรมการวิจัยความละเอียดเชิงแล้วนั้น

การนี้ กรรมการผู้ทบทวนหลัก ได้เห็นสมควรให้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยได้รับรองวันที่ 24 ตุลาคม 2556 ( 15/56 - 18 พ.ย. 56 )

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

*ฉันทนา ชัยชนะวงศาโรจน์*

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา ชัยชนะวงศาโรจน์)

กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน  
กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AF 01-12



คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ชั้น 4 ซอยจุฬาลงกรณ์ 62 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทรศัพท์: 0-2218-8147 โทรสาร: 0-2218-8147 E-mail: eccu@chula.ac.th

COA No. 180/2556

## ใบรับรองโครงการวิจัย

โครงการวิจัยที่ 119.1/56 : การศึกษาโมเดลตำแหน่งจุดกระทบบนเอ็นหน้าไม้กเทนนิสที่ทำให้เกิด  
ความเร็วสูงสุดในการเสิร์ฟลูกแบ็กด้วยเครื่องทดสอบแบบ 3 มิติ จาก  
นักกีฬาเยาวชนชายทีมชาติ

ผู้วิจัยหลัก : นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส

หน่วยงาน : คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ได้พิจารณา โดยใช้หลัก ของ The International Conference on Harmonization – Good Clinical Practice  
(ICH-GCP) อนุมัติให้ดำเนินการศึกษาวิจัยเรื่องดังกล่าวได้

ลงนาม.....

(รองศาสตราจารย์นายแพทย์ปริดา ทักคนประดิษฐ์)

ประธาน

ลงนาม.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มันนรี ชัยชนะวงศาโรจน์)

กรรมการและเลขานุการ

วันที่รับรอง : 24 ตุลาคม 2556

วันหมดอายุ : 23 ตุลาคม 2557

## เอกสารที่คณะกรรมการรับรอง

- 1) โครงการวิจัย
- 2) ข้อมูลสำหรับกลุ่มประชากรหรือผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยและใบยินยอมของกลุ่มประชากรหรือผู้มีส่วนร่วมในการวิจัย
- 3) ผู้วิจัย
- 4) แบบสอบถาม



เลขที่โครงการวิจัย 119.1/56  
วันที่รับรอง 24 ต.ค. 2556  
วันหมดอายุ 23 ต.ค. 2557

## เงื่อนไข

1. เจ้าหน้าที่หรือหน่วยงานที่รับผิดชอบโครงการฯ หากดำเนินการเก็บข้อมูลการวิจัยก่อนได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน
2. หากใบรับรองโครงการวิจัยหมดอายุ การดำเนินการวิจัยต้องยุติ เมื่อต้องการต่ออายุต้องขออนุมัติใหม่ล่วงหน้าไม่น้อยกว่า 1 เดือน หรือส่งรายงานผลการดำเนินงานวิจัย
3. ต้องดำเนินการวิจัยตามที่ระบุไว้ในโครงการวิจัยอย่างเคร่งครัด
4. วัตถุประสงค์ข้อมูลสำหรับกลุ่มประชากรหรือผู้มีส่วนร่วมในการวิจัย ใบยินยอมของกลุ่มประชากรหรือผู้มีส่วนร่วมในการวิจัย และเอกสารแจ้งผู้เข้าร่วมวิจัย เกี่ยวกับ วัตถุประสงค์ประโยชน์และผลกระทบที่แน่นอน
5. หากเกิดเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์หรือแรงกดดันที่เกินข้อมูลที่ขออนุมัติจากคณะกรรมการฯ ต้องรายงานคณะกรรมการภายใน 5 วันทำการ
6. หากมีข้อเปลี่ยนแปลงการดำเนินการวิจัย ให้ส่งคณะกรรมการพิจารณาใบรับรองก่อนดำเนินการ
7. โครงการวิจัยไม่เกิน 1 ปี นับนับจากวันสิ้นสุดโครงการวิจัย (AF 03-12) และบทคัดย่อผลการวิจัยภายใน 30 วัน เมื่อโครงการวิจัยเสร็จสิ้น สำหรับโครงการวิจัยที่เป็นวิทยานิพนธ์ให้ส่งบทคัดย่อผลการวิจัย ภายใน 30 วัน เมื่อโครงการวิจัยเสร็จสิ้น

AF 02-12



The Ethics Review Committee for Research Involving Human Research Subjects,  
Health Science Group, Chulalongkorn University  
Institute Building 2, 4 Floor, Soi Chulalongkorn 62, Phyat hai Rd., Bangkok 10330, Thailand,  
Tel: 0-2218-8147 Fax: 0-2218-8147 E-mail: [eccu@chula.ac.th](mailto:eccu@chula.ac.th)

COA No. 180/2013

### Certificate of Approval

**Study Title** No.119.1/56 : A STUDY ON IMPACT MODEL OF TENNIS FLAT SERVE AT RACKET'S MAXIMUM BALL SPEED SPOT IN 3D USING NATIONAL YOUTH MALE PLAYERS

**Principal Investigator** : MR.CHAIYASITH PAVILAS

**Place of Proposed Study/Institution** : Faculty of Sports Science,  
Chulalongkorn University

The Ethics Review Committee for Research Involving Human Research Subjects, Health Science Group, Chulalongkorn University, Thailand, has approved constituted in accordance with the International Conference on Harmonization – Good Clinical Practice (ICH-GCP) and/or Code of Conduct in Animal Use of NRCT version 2000.

Signature: Prida Tasanapradit Signature: Nuntaree Chaichanawongsaroj  
(Associate Professor Prida Tasanapradit, M.D.) (Assistant Professor Dr. Nuntaree Chaichanawongsaroj)  
Chairman Secretary

Date of Approval : 24 October 2013 Approval Expire date : 23 October 2014

#### The approval documents including

- 1) Research proposal
- 2) Patient/Participant Information Sheet and Informed Consent Form
- 3) Researcher
- 4) Questionnaire



Protocol No. 119.1/56  
Date of Approval 24 OCT 2013  
Approval Expire Date 23 OCT 2014

#### The approved investigator must comply with the following conditions:

1. The research/project activities must end on the approval expired date of the Ethics Review Committee for Research Involving Human Research Subjects, Health Science Group, Chulalongkorn University (ECCU). In case the research/project is unable to complete within that date, the project extension can be applied one month prior to the ECCU approval expired date.
2. Strictly conduct the research/project activities as written in the proposal.
3. Using only the documents that bearing the ECCU's seal of approval with the subjects/volunteers (including subject information sheet, consent form, invitation letter for project/research participation (if available).
4. Report to the ECCU for any serious adverse events within 5 working days
5. Report to the ECCU for any change of the research/project activities prior to conduct the activities.
6. Final report (AF 03-12) and abstract is required for a one year (or less) research/project and report within 30 days after the completion of the research/project. For thesis, abstract is required and report within 30 days after the completion of the research/project.
7. Annual progress report is needed for a two- year (or more) research/project and submit the progress report before the expire date of certificate. After the completion of the research/project processes as No. 6.

หนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย  
สำหรับผู้เข้าร่วมในการวิจัย อายุ 18 ปี (Informed consent from-2)

ทำที่.....  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

เลขที่ ประชากรตัวอย่างหรือผู้เข้าร่วมในการวิจัย.....

ข้าพเจ้า ซึ่งได้ลงนามท้ายหนังสือนี้เกี่ยวข้อขงเป็นผู้เข้าร่วมในการวิจัย (ชื่อผู้เข้าร่วมในการวิจัย)

.....) ข้าพเจ้าขอแสดงความยินยอมในการเข้าร่วมโครงการวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาในเคสคัดกรองจุดกระตบบนผิวหนังหน้าไม้ทอนนิสที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดใน  
การเสิร์ฟลูกแม่เหล็กด้วยเครื่องทดสอบ แบบ 3 มิติ จากศูนย์พัฒนารचनाชาติ

ผู้วิจัย นายชิตสิทธิ์ ภาวิลาศ

สถานที่เกิดของผู้วิจัย คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์มือถือ 089-1168919 E-mail: chaisith.po@gmail.com

โครงการวิจัย..... 119-1/5  
รับขอ..... 24 ต.ค. 2566  
พิมพ์..... 23 ต.ค. 2567

ข้าพเจ้าผู้เข้าร่วมในการวิจัย ได้รับทราบรายละเอียดเกี่ยวกับที่มาและวัตถุประสงค์ในการทำวิจัย รายละเอียดขั้นตอน  
ต่างๆ ที่จะต้องปฏิบัติหรือได้รับการปฏิบัติ ความเสี่ยงอันตราย และประโยชน์ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการวิจัยเรื่องนี้ ข้าพเจ้าได้อ่าน  
รายละเอียดในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัยโดยตลอด และได้รับคำอธิบายจากผู้วิจัย จนเข้าใจเป็นอย่างดีแล้ว


ข้าพเจ้าจึงสมัครใจเข้าร่วมในการวิจัยนี้ ภายใต้เงื่อนไขที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย โดยข้าพเจ้า  
ยินยอมเข้าร่วมการวิจัย โดยขอเข้าร่วมการทดสอบสมรรถภาพทางกายพื้นฐาน และวัดความสามารถในการแสดงทักษะเทคนิค  
จำนวน 1 ครั้ง และทดสอบความสามารถในการเสิร์ฟลูกแรก จำนวน 1 รายการตลอดโครงการวิจัย ซึ่งจะเวียนแบบตามรายการ  
แข่งขันระดับนานาชาติ เฉพาะในการเสิร์ฟลูกแรกเท่านั้น ดังนั้นนักกีฬาแต่ละคนจะต้องเสิร์ฟแบบเสิร์ฟลูกแรกด้วยไม้  
ทอนนิสอันใหม่ ซึ่งมีลักษณะที่ตนเองเคยใช้มาก่อน ชุดละ 5 ครั้ง จำนวน 20 ชุด มีการพักระหว่างจุด (1 นาที) และระหว่างจุด  
( 2 นาที) สถิติการแข่งขันขี้นมาทั้งหมด รวม 100 ลูกต่อรายการแข่งขัน (จากการแข่งขัน 1 แมทช์ มี 3-6 เกม แต่ละเกมจะ  
เสิร์ฟประมาณ 5 ครั้ง และแข่งขัน 3-5 เซตต่อแมทช์ เป็นต้น) บันทึกข้อมูลจากกล้องวิดีโอความถี่สูงของเครื่องวิเคราะห์ภาพ  
การเคลื่อนไหว แบบ 3 มิติ ทั้งนี้วิดีโอที่บันทึกมีลักษณะเสิร์ฟลูก เมื่อเสร็จสิ้นการวิจัยและรายงานผลจะถ่ายทั้งทั้งหมด

ข้าพเจ้าผู้เข้าร่วมในการวิจัยมีสิทธิหรือเป็นความประสงค์ ขอถอนตัวจากการวิจัยเมื่อใดก็ได้ โดยไม่ต้องแจ้งเหตุผล  
ซึ่งการถอนตัวออกจากการวิจัยนั้น จะไม่มีผลกระทบต่อในทางใดๆ ต่อผู้ที่อยู่ในปกครองในความดูแลของข้าพเจ้าและตัวข้าพเจ้า  
ทั้งสิ้น (ระบุเป็นต้นว่า ได้รับการรักษาพยาบาลแล้ว)

ข้าพเจ้าได้รับคำรับรองว่า ผู้วิจัยจะปฏิบัติคือผู้เข้าร่วมในการวิจัยตามข้อมูลระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการ  
วิจัย และข้อมูลใดๆที่เกี่ยวข้อขงกับผู้เข้าร่วมในการวิจัย ผู้วิจัยจะเก็บรักษาเป็นความลับ โดยจะนำเสนอข้อมูลจากการวิจัยเป็น  
ภาพรวมเท่านั้น ไม่มีข้อมูลใดในการรายงานที่จะนำไปสู่การระบุตัวผู้ที่อยู่ในปกครองในความดูแลของข้าพเจ้าและตัวข้าพเจ้า

หากข้าพเจ้าผู้เข้าร่วมในการวิจัย ไม่ได้รับการปฏิบัติตรงตามที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย ข้าพเจ้า  
สามารถร้องเรียนได้ที่ คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ชั้น 4  
อาคารสถาบัน 2 ซอยจุฬาลงกรณ์ 62 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทรศัพท์ 0-2218-8147 โทรสาร 0-2218-  
8147 E-mail: eccu@chula.ac.th

ข้าพเจ้าได้ลงลายมือชื่อไว้เป็นสำคัญต่อหน้าพยาน ทั้งนี้ข้าพเจ้าได้รับสำเนาเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย และ  
สำเนาหนังสือแสดงความยินยอมไว้แล้ว

เลขที่..... เลขที่.....  
 (นายช่อสิทธิ์ ภาวิธาน) (.....)  
 ผู้วิจัยหลัก ผู้มีส่วนร่วมในการวิจัย  

 โครงการวิจัย..... 119-1/56  
 วันที่รับรอง..... 24 ต.ค. 2556  
 วันที่ขยาย..... 23 ต.ค. 2557

เลขที่.....  
 (.....)  
 พ่อแม่ผู้ปกครองผู้ดูแล.....

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยสิทธิ์ ภาวิลาส เกิดวันที่1 เมษายน 2501 ณ จังหวัดสุพรรณบุรี, ปัจจุบันอาศัยอยู่ บ้านเลขที่100/502 หมู่บ้านชัยพฤกษ์ ถนนคุ้มเกล้า แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 02-9148891 มือถือ 089-1168919 อีเมลล์ chaisith.pa@gmail.com

จบการศึกษา:วท.ม.(สรีรวิทยาการออกกำลังกาย) มหาวิทยาลัยมหิดล (2530) และวท.บ.(เทคนิคการแพทย์) มหาวิทยาลัยมหิดล (2525)

ประวัติการทำงาน:เป็นรองผู้อำนวยการศูนย์ทดสอบ วิจัย วัสดุและอุปกรณ์ทางการกีฬา คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาฯ (2551-55) ผู้อำนวยการกองวิจัยและพัฒนากีฬา กกท. (2543-50) หัวหน้างานวิจัยวิทยาศาสตร์ กกท.(2536-42) และนักวิทยาศาสตร์ กกท. (2530-35)

ผลงานวิจัย:เป็นหัวหน้าคณะวิจัยงานด้านสรีรวิทยาการออกกำลังกายและกีฬา รวม 12 เรื่อง

เครื่องราชอิสริยาภรณ์:จัตุรถาภรณ์มงกุฎไทย (2550) เบญจมาภรณ์ช้างเผือก (2545) และเบญจมาภรณ์มงกุฎไทย (2542)

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง:รองคณบดีคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต