

พลังงานประสิทธิผลในการทดสอบการเจาะทะลุหกลวดมาตรฐานโดยตู่ตอกชนิดต่างๆ

ENERGY EFFICIENCY IN STANDARD PENETRATION TEST USING DIFFERENT TYPES OF HAMMER

ธีรัชัย เต็งชู (Teerachai Tengchoo)¹
สยาม ยิ้มศิริ (Siam Yimsiri)²
สุทธิศักดิ์ สรลัมพ์ (Suttisak Soralump)¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการวัดพลังงานประสิทธิผลในการทดสอบการเจาะทะลุหกลวดมาตรฐานสำหรับการปฏิบัติในประเทศไทย โดยประกอบด้วย (i) การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบในการวัดพลังงานโดยใช้วิธี Force-Velocity Method และ (ii) การวัดพลังงานประสิทธิผลที่ได้จากการใช้ตู่ตอกชนิดต่างๆคือ โดนัท, เซฟตี้, และ ทริป ค่าพลังงานประสิทธิผลจากการทดลองได้เปรียบเทียบกับค่าที่ให้ไว้จากงานวิจัยต่างประเทศ ผลการวิจัยนี้จะประโยชน์ในการปรับแก้ค่า Standard Penetration Test (SPT) ที่ได้จากการปฏิบัติในประเทศไทยให้เป็นค่าพลังงานมาตรฐานเพื่อการ correlation ไปสู่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกต้องต่อไป

ABSTRACT : This research aims to measure the energy efficiency of Standard Penetration Test (SPT) performed by the practice in Thailand. The research consists of (i) the development of SPT energy measuring equipment based on force-velocity method and (ii) energy efficiency measurement from different types of hammer, i.e. donut, safety, and trip. The energy efficiency obtained from this research is compared with the published data. The results from this research will be useful for energy correction of the SPT result by the practice in Thailand to subsequently obtain a correct correlation for engineering properties of soils.

KEYWORDS : Standard Penetration Test, Correction factor, Energy, In-situ test, Hammer

1. บทนำ

Standard Penetration Test (SPT) เป็นเครื่องมือทดสอบดินในสนามที่วิศวกรปฐพีทั่วโลกนิยมใช้ในการเจาะสำรวจดินสำหรับการออกแบบฐานรากทั่วไป ปริมาณการออกแบบฐานรากทั่วไปประมาณ 80-90% จะใช้ข้อมูลดินจากการทดสอบ SPT [13] อีกทั้งยังมี correlation มากมายที่ใช้ SPT N-value เพื่อประมาณคุณสมบัติของดินอื่นๆ เช่น allowable bearing capacity, shear strength, relative density, settlement, และ compressibility

อย่างไรก็ตามผลการทดสอบ SPT จะมีความแปรปรวนและมี repeatability ต่ำ ได้มีการสังเกตความแตกต่างเป็นอย่างมากของผลการทดสอบจากวิศวกรที่ปรึกษาที่ต่างกันจาก site ที่มีความสม่ำเสมอที่ทะเลสาบมิชิแกน [8] และได้มีรายงานความแตกต่างของ blow count ที่ site เดียวกันและความลึกเดียวกันจาก drill rig ที่แตกต่างกัน 3 rig [25] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [1] ได้รวบรวมผลการทดสอบ SPT ในเขตกรุงเทพมหานครจากบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาต่างๆและพบว่ามีความแปรปรวนสูงมากดังรูปที่

1 ความแตกต่างของผลการทดสอบ SPT นี้เป็นเพราะค่า blow count แปรผกผันกับพลังงานที่ส่งถ่ายไปยังกระบอกผ่า ฉะนั้นจึงได้เริ่มมีการศึกษาถึงปัจจัยที่ควบคุมปริมาณพลังงานนี้ [18] การศึกษาในช่วงแรก เช่น การศึกษาความเร็วของค้อนตอกก่อนการตกกระทบ [12] และการวัด dynamic force-time relationship ในก้านเจาะที่อยู่ใต้ anvil และในตำแหน่งเหนือกระบอกผ่า [19] การศึกษาทางทฤษฎีก็ได้ถูกกระทำขึ้นเช่นกัน [15] จากผลการศึกษาพบว่าการแปรผันของพลังงานในการทดสอบ SPT อย่างมากระหว่าง 36-82% โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 56% ภายใต้การทดสอบปกติ [20] โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบ SPT คือ ปริมาณของพลังงานที่ส่งไปที่ก้านเจาะจากระบบค้อนตอก

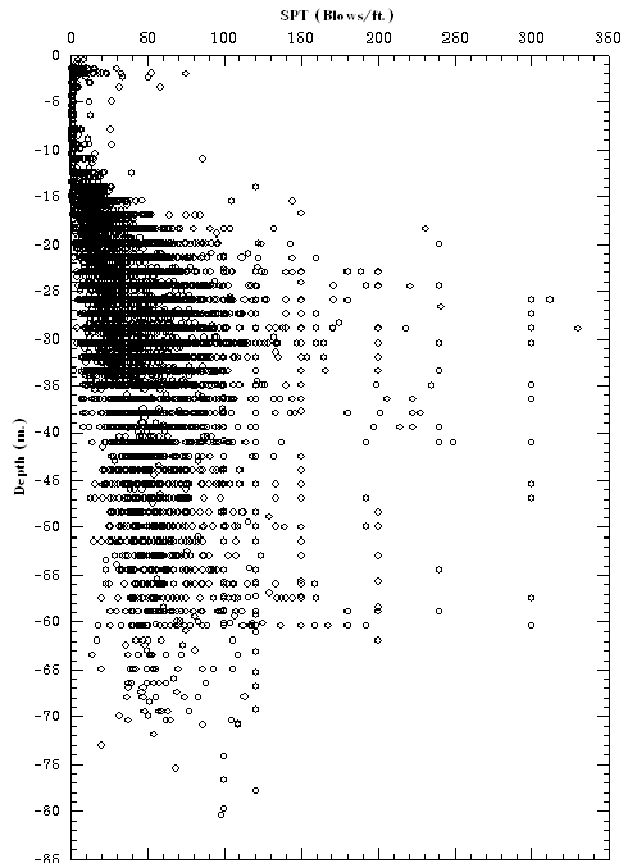
อย่างไรก็ตามยังไม่เคยมีการวัดพลังงานของการทดสอบ SPT สำหรับการปฏิบัติในประเทศไทย ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค่าพลังงานในการทดสอบ SPT ของเครื่องมือและวิธีการทดสอบที่ใช้ในประเทศไทยโดยเน้นความสนใจไปที่ชนิดของค้อนตอกแบบต่างๆ

2. การทดสอบการเจาะทะลุหาลงมาตรฐาน

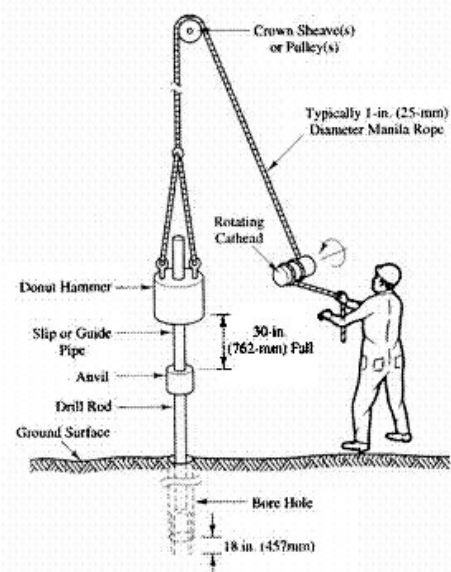
Standard Penetration Test (SPT) ถูกพัฒนาในประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ ค.ศ. 1927 และได้กลายเป็นการทดสอบดินในสนามที่ถูกใช้มากที่สุด โดย SPT มีข้อดีคือ (i) เครื่องมือการทดสอบไม่ซับซ้อนและทนทาน, (ii) ขั้นตอนการทดสอบไม่ซับซ้อน, (iii) สามารถเก็บตัวอย่างดินได้ด้วย, (iv) สามารถใช้ทดสอบดินเกือบทุกประเภท, และ (v) ได้มีการพัฒนา correlation ขึ้นมากมาย การทดสอบ SPT กระทำโดยการปล่อยค้อนน้ำหนักขนาด 63.5 กิโลกรัม (140 ปอนด์) จากความสูง 760 มิลลิเมตร (30 นิ้ว) ให้ตกกระทบก้านเจาะ จำนวนครั้งในการตอกเพื่อให้หัวตอกมาตรฐานจมลงไป 300 มิลลิเมตร (หลังจาก seating drive 150 มิลลิเมตร) นั้นเรียกว่า penetration resistance หรือ *N*-value รูปที่ 2 แสดงภาพร่างของการทดสอบ SPT ที่ใช้ระบบ cathead & rope และใช้ค้อนตอกแบบโคนัท ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามที่จะสร้างมาตรฐานสำหรับการทดสอบ SPT (เช่น [2], [7], [9], [10]) แต่ก็ยังคงมีความไม่ตรงกันของการปฏิบัติการทดสอบ

ผลของงานวิจัยด้านการวัดการส่งถ่ายพลังงานใน SPT ในช่วงทศวรรษที่ 1980 แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ถูกส่งถ่ายให้ก้านเจาะ

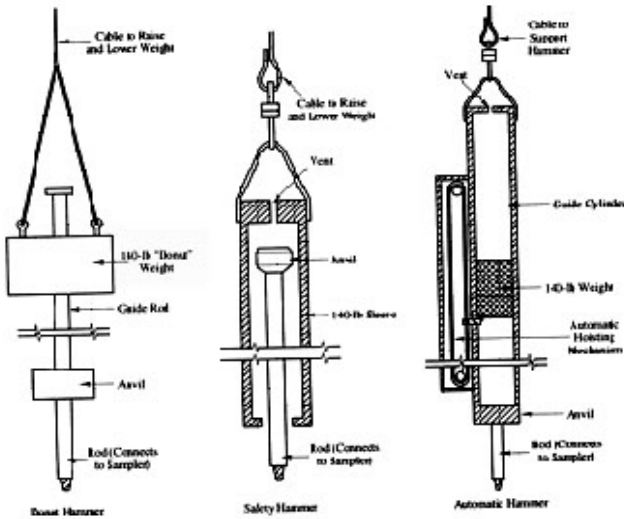
ระหว่างการทดสอบ SPT มีค่าระหว่าง 30 และ 90% ([13], [17]) การส่งถ่ายพลังงานขึ้นอยู่กับ releasing-system, ค้อนตอก, anvil, และผู้ปฏิบัติการทดสอบ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือชนิดของค้อนตอกและ anvil ซึ่งมีชนิดของค้อนตอกหลายแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแต่ที่นิยม คือ โคนัท, เซฟตี, และ ทรีป [11] (รูปที่ 3)



รูปที่ 1 ค่า SPT กับความลึกบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานคร [1]



รูปที่ 2 การทดสอบ SPT [13]



รูปที่ 3 ชนิดของค้อนตอก [6]

ได้มีการเสนอแนะว่าปริมาณพลังงานประสิทธิผลที่ 60% เป็นตัวแทนปริมาณพลังงานเฉลี่ยของ SPT-based empirical correlation ([14], [17], [22]) และการวิเคราะห์ liquefaction จากค่า SPT จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการปรับแก้พลังงานไปที่ 60% [22] ค่า SPT N -value ที่รู้ปริมาณพลังงาน ER_i สามารถปรับแก้ไปเป็น SPT ที่พลังงาน 60% โดยสมการที่ (1)

$$N_{60} = N \frac{ER_i}{60} \quad (1)$$

จากข้อมูลที่ถูกรวบรวมได้มีการแนะนำค่า energy ratio โดยทั่วไปที่ใช้สำหรับการแปลงค่า SPT ดังแสดงในตารางที่ 1 พร้อมทั้งการปรับแก้อื่นๆ เช่น ความยาวก้านเจาะ, ชนิดของกระบอกผ่า, และขนาดของหลุมเจาะ ([22], [23])

3. การวัดพลังงานในการทดสอบ SPT

การวัดพลังงานในการทดสอบ SPT ได้เริ่มตั้งแต่ทศวรรษที่ 1970 โดยการพัฒนาวิธี F^2 [21] โดยพลังงานได้จากการ integrate ของกำลังสองของแรงในก้านเจาะ และการวัดแรงก็ใช้ strain-gauged load cell เพราะการใช้ accelerometer ในเวลานั้นยังให้ผลไม่น่าเชื่อถือ ได้มีการศึกษาค่าพลังงานของก้านเจาะและค้อนตอกชนิดต่างๆพบว่าพลังงานส่วนใหญ่จากการตอกเกิดขึ้นในการตกกระทบครั้งแรก ทำให้สามารถกำหนดการ integrate F^2 จนถึงเวลาสะท้อนของคลื่นแรงดึง พลังงานจากวิธี F^2 กำหนดโดยสมการที่ (2)

$$E_i = \frac{c}{AE} \int_0^{\Delta t} [F(t)]^2 dt \quad (2)$$

โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดของก้านเจาะ
 c = ความเร็วของคลื่นแรงอัดในก้านเจาะ (≈ 5120 m/sec สำหรับเหล็ก)
 E = Young's modulus ของก้านเจาะ
 E_i = พลังงานที่ถ่ายเทสู่ก้านเจาะระหว่างการตกกระทบ
 $F(t)$ = dynamic force ในก้านเจาะซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา
 t = เวลา
 Δt = เวลาระหว่างการเริ่มต้นเดินทางของคลื่นแรงอัด

ในทศวรรษที่ 1990 ได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดเพื่อสามารถวัดความเร่งของก้านเจาะและได้มีการเสนอวิธีการวิเคราะห์พลังงานแบบใหม่ด้วยการ integrate ผลคูณของแรงและความเร็ว (วิธี FV) และวิธีนี้ได้กำหนดให้เป็นมาตรฐานใน ASTM D4633 [3] ในปัจจุบัน โดยพลังงานนิยามโดยสมการที่ (3)

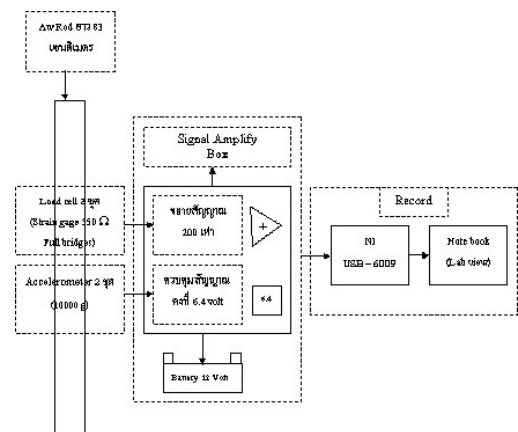
$$E_i = \int_0^{\max} F(t)v(t)dt \quad (3)$$

โดยที่ \max = เวลาของ maximum energy ระหว่างการตกกระทบ
 $v(t)$ = ความเร็วของก้านเจาะซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา

Drill rod energy ratio ER_i นิยามโดยสัดส่วนของ E_i และ E^* โดย E^* เป็นพลังงานมาตรฐานของการทดสอบ SPT (475 J)

4. การพัฒนาอุปกรณ์วัดพลังงาน

การพัฒนาอุปกรณ์วัดพลังงานได้ออกแบบให้สอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบและพิจารณาอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดโดยเปรียบเทียบตามตารางที่ 2 ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์วัดพลังงานจะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ (i) อุปกรณ์วัดสัญญาณ, (ii) อุปกรณ์ขยายสัญญาณ, และ (iii) อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 รายละเอียดของอุปกรณ์วัดพลังงานการทดสอบ SPT

ตารางที่ 1 การปรับแก้ผลการทดสอบ SPT [6]

Hammer for η_1				Remarks	
Average energy ratio E_r					
Donut		Safety		R-P = Rope-pulley	
Country	R - P	Trip	R - P	Trip/Auto	
United States /North America	45	-	70- 80	80-100	$\eta_1 = E_r/E_{rb}$ For U.S.
Japan	67	78	-	-	Trip/Auto
United Kingdom	-	-	50	60	$E_r/E_{rb} = 80$
China	50	60	-	-	$\eta_1 = 80/60$

Rod length correction η_2				
Length > 10 m		$\eta_2 =$	1	N is too high
6-10			0.95	for L <10 m
4 -6			0.85	
0 - 4			0.75	

Sampler correction η_3				
Without liner		$\eta_3 =$	1	Base value
With liner Denes sand clay			0.8	N is too
Loose sand			0.9	high with liner

Borehole diameter correction η_4				
Hole diameter	60-120 mm	$\eta_4 =$	1	Base value;
	150 mm		1.05	N is too small
	200 mm		1.15	oversize hole

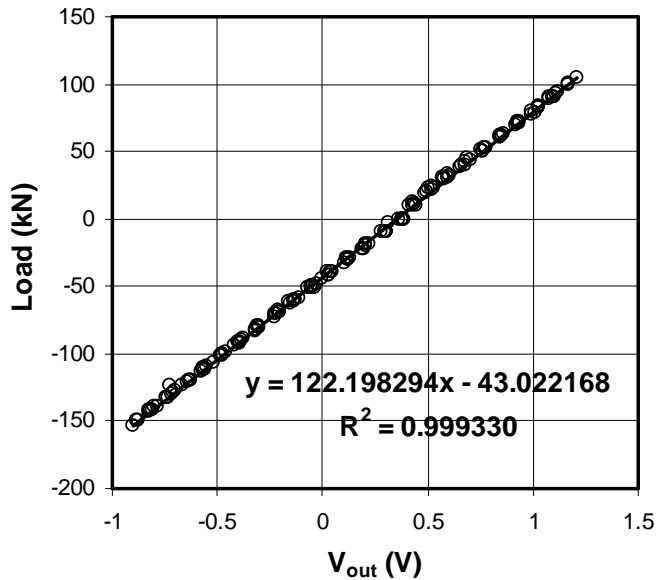
อุปกรณ์วัดสัญญาณเป็นก้านเจาะชนิด AW ยาว 830 mm โดยจะติดตั้ง load cell และ accelerometer อย่างละ 2 ชุด โดย load cell นั้นทำมาจาก strain gage 350 Ω แบบ biaxial ต่อวงจรแบบ full bridge ส่วน accelerometer มีขนาด 10000 g อุปกรณ์วัดสัญญาณได้แสดงในรูปที่ 5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ชุดขยายสัญญาณของ load cell และชุดควบคุมสัญญาณของ accelerometer ส่วนอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (data acquisition) ใช้ NI USB – 6009 ซึ่งมี 14 bit และมีช่องสำหรับต่อ load cell และ accelerometer ทั้งหมด 4 ช่อง โดยเลือก V_{in} ของช่อง load cell เท่ากับ ± 2.5 V และ V_{in} ของช่อง accelerometer เท่ากับ ± 1 V โดยสัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึกลง

ในคอมพิวเตอร์ที่ความถี่ 10000 Hz และใช้โปรแกรม Labview ควบคุม



รูปที่ 5 เครื่องมือวัดพลังงานการทดสอบ SPT การสอบเทียบ load cell ทำโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) กดและดึงก้านเจาะพร้อมทั้งวัดโวลต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงที่เพิ่มขึ้น-ลดลง จำนวน 3 รอบการ

ทดสอบ (กำหนดให้แรงดึงเท่ากับ -150 kN และแรงอัดเท่ากับ +100 kN) และนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าโวลต์กับแรงที่ได้มาหาสัมประสิทธิ์ของ load cell ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์ของ load cell จากการสอบเทียบ

ชุดอุปกรณ์วัดพลังงานจะถูกนำไปติดตั้งระหว่างก้านเจาะอันบนสุดกับชุดค้ำคอกเพื่อวัดพลังงานที่ถ่ายจากค้ำคอกลงสู่ก้านเจาะระหว่างการทดสอบ SPT ดังรูปที่ 7

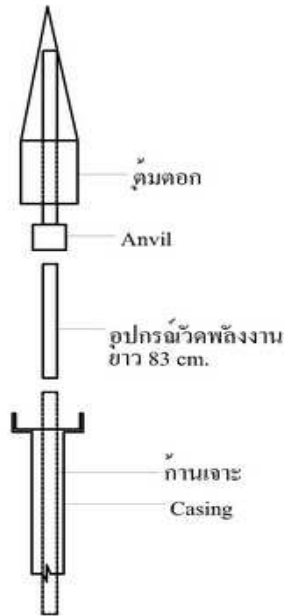
5. พลังงานจากค้อนชนิดต่างๆ

ข้อมูลของแรงและความเร่งซึ่งถูกเก็บด้วยความถี่ 10000 Hz เป็นระยะเวลา 5 sec จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาพลังงานโดยจะสนใจข้อมูลในระยะเวลาก่อนที่คลื่นจะสะท้อนจากก้นหลุมผ่านอุปกรณ์วัดพลังงาน (เวลา 0 ถึง $2l/c$ โดยที่ l = ความยาวของก้านเจาะ) การวิเคราะห์ค่าความเร็ว v จากข้อมูลความเร่ง a จะให้นำหนักมากกว่ากับค่าความเร่งตรงกลาง (Simpson's rule) ดังแสดงในสมการที่ (4) และจะทำการปรับแก้ค่าคงที่ของการ integrate เพื่อให้ค่าแรง F และความเร็ว v ที่เวลา $2l/c$ มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\Delta v(t) = \left(\frac{a(t-1) + 4a(t) + a(t+1)}{6} \right) [t - (t-1)] \quad (4)$$

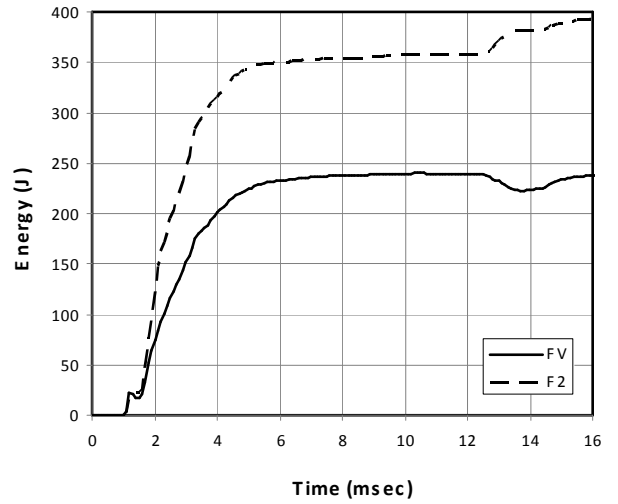
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบการออกแบบอุปกรณ์วัดพลังงาน

รายละเอียด	เอกสารเผยแพร่ของบริษัท		มาตรฐานทดสอบวัดพลังงาน		งานวิจัยนี้
	Test consult [24]	Pile dynamic [16]	ASTM D 4633 [3]	ISO 22476 - 3 [10]	
Instrumented Rod					
ความยาว	1000 mm	600 mm	ไม่น้อยกว่า 600 mm	ไม่ระบุ	830 mm
ขนาด	54 mm. (OD)	AW, NW	ขนาดเดียวกับก้านเจาะ	ไม่ระบุ	AW, 44.3 mm (OD)
Stain gauge					
จำนวน	2 ชุด	2 ชุด (350 Ω)	2 ชุด	ไม่ระบุ	2 ชุด (350 Ω) ชุดละ 4 ตัว
วงจร	Full bridge	Full bridge	Full bridge	ไม่ระบุ	Full bridge
ตำแหน่งติดตั้ง	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่น้อยกว่า 300 mm	$10 d_u$	300 mm จากปลาย
Accelerometer					
จำนวน	2 ชุด	2 ชุด (10000 g)	ไม่น้อยกว่า 10000 g	5000 g ขึ้นไป	2 ชุด (10000 g)
ตำแหน่งติดตั้ง	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ห่าง strain gage 100 mm	ไม่ระบุ	400 mm จากปลาย
Sampling rate	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	10000 Hz	ไม่ระบุ	10000 Hz
Sampling duration	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	50 msec	ไม่ระบุ	5 sec

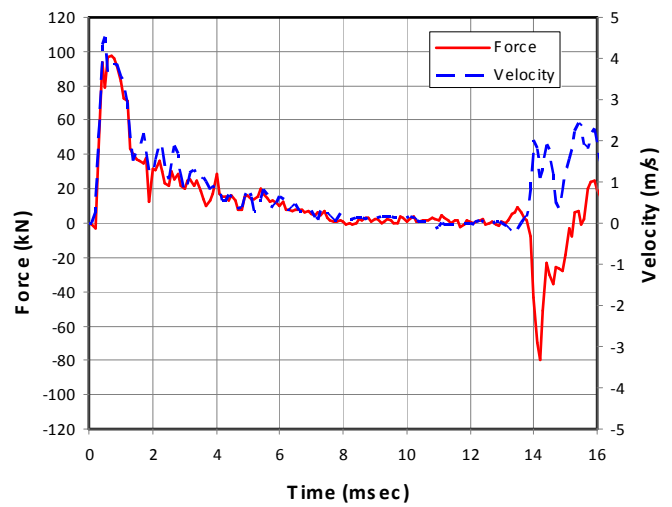


รูปที่ 7 การประกอบอุปกรณ์วัดพลังงานในการทดสอบ

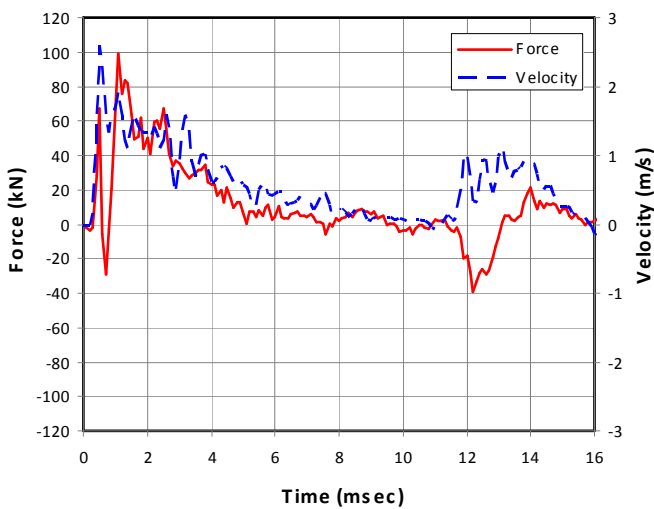
การวัดพลังงานในการทดสอบ SPT ได้ทำการทดสอบในบริเวณพื้นที่เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ โดยในการทดสอบได้ใช้ค้อนตอกทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ โคนันท์, เซฟตี้, และ ทริป การทดสอบวัดพลังงานจะทดสอบทั้งหมด 3 ชั้นความลึกของหลุมเจาะโดยอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งและดินทราย ผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 3 และตัวอย่างของข้อมูลการทดลองจากค้อนตอกแบบโคนันท์, เซฟตี้, และ ทริป ได้แสดงในรูปที่ 8, 9, และ 10 ตามลำดับ



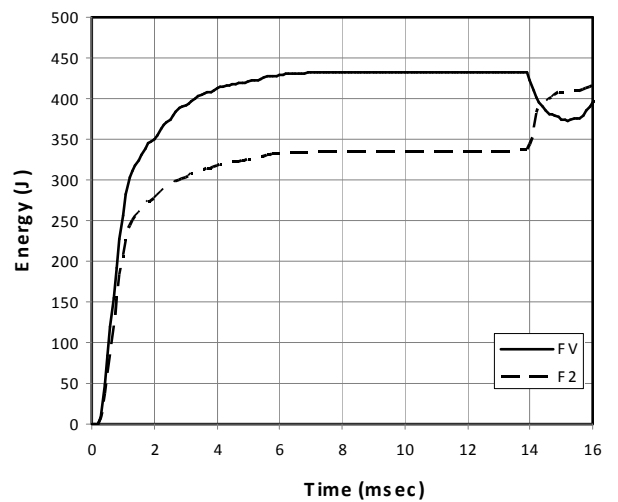
รูปที่ 8b พลังงานจากค้อนตอกโคนันท์ที่ความลึก 26.0 m



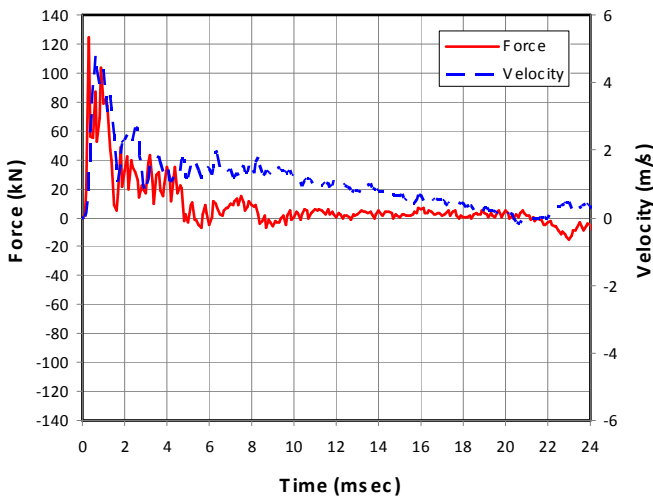
รูปที่ 9a แรงและความเร็วที่วัดได้จากค้อนตอกเซฟตี้ที่ความลึก 32.0 m



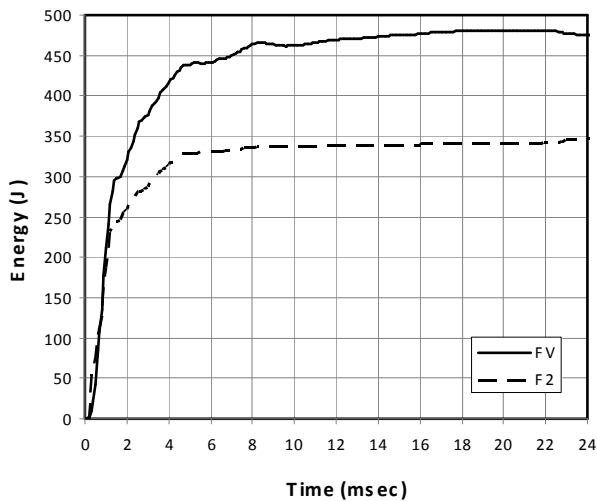
รูปที่ 8a แรงและความเร็วที่วัดได้จากค้อนตอกโคนันท์ที่ความลึก 26.0 m



รูปที่ 9b พลังงานจากค้อนตอกเซฟตี้ที่ความลึก 32.0 m.



รูปที่ 10a แรงและความเร็วที่วัดได้จากตุ้มตอกทริปที่ความลึก 50.0 m



รูปที่ 10b พลังงานจากตุ้มตอกทริปที่ความลึก 50.0 m

6. วิเคราะห์ผลการทดลอง

ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกชนิดต่างๆที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้สรุปในตารางที่ 4 (จากการวิเคราะห์แบบ FV) และได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยอื่น (จากตารางที่ 1) ซึ่งจะเห็นว่าค่าพลังงานประสิทธิผลของการทดสอบ SPT ที่ปฏิบัติในประเทศไทยตรงกับขอบเขตของค่าที่เสนอสำหรับ US/North America มากที่สุด

รูปที่ 11 แสดงค่า % standard deviation ของผลการทดสอบของตุ้มตอกและการวิเคราะห์แบบต่างๆ โดยค่า % standard deviation นิยามตามสมการที่ (5) [5] โดย ASTM E456 [4] นิยาม precision ว่าเป็นความใกล้เคียงกันของค่าที่ได้จากการวัดซ้ำที่สภาพเดียวกัน ดังนั้นค่า % standard deviation ที่มาก

แสดงว่า precision มีค่าน้อย ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าผลการทดสอบของตุ้มตอกแบบโดนัทที่วิเคราะห์โดยวิธี F^2 ให้ค่า precision น้อยสุด ส่วนตุ้มตอกแบบโดนัทที่วิเคราะห์ด้วยวิธี FV และตุ้มตอกแบบอื่นๆมีค่า precision ที่ดีกว่า

$$\% \text{ standard deviation} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} / \bar{x} \quad (5)$$

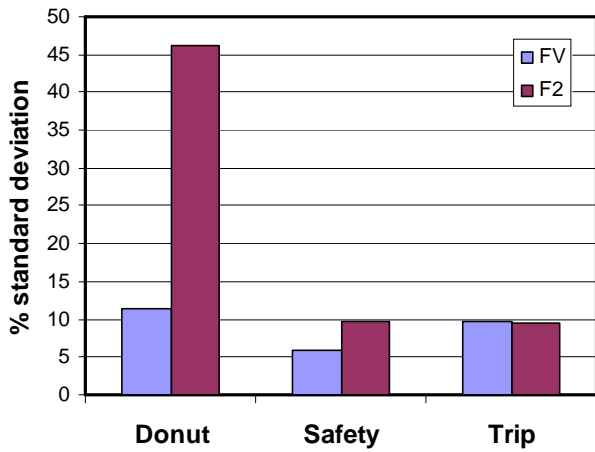
โดยที่ \bar{x} = ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ = $\sum_{i=1}^n x_i / n$
 x = ผลการทดสอบแต่ละครั้ง
 n = จำนวนการทดสอบ

ตารางที่ 3 ผลการวัดพลังงานจากตุ้มตอกชนิดต่างๆ

ตุ้มตอก	ความลึก (m)	$2l/c$ (msec)	Energy type	E (J)	ER_i (%)
Donut	23.0	9.2	FV	258	54
			F^2	912	192
	24.5	9.6	FV	206	43
			F^2	643	136
Safety	26.0	10.3	FV	229	48
			F^2	331	70
	29.0	11.6	FV	342	72
			F^2	401	84
Trip	30.5	12.2	FV	304	64
			F^2	397	84
	32.0	12.8	FV	420	88
			F^2	336	71
Safety	50.0	19.8	FV	481	101
			F^2	341	72
	51.5	20.4	FV	400	84
			F^2	400	84
53.0	21.0	FV	467	98	
		F^2	407	86	

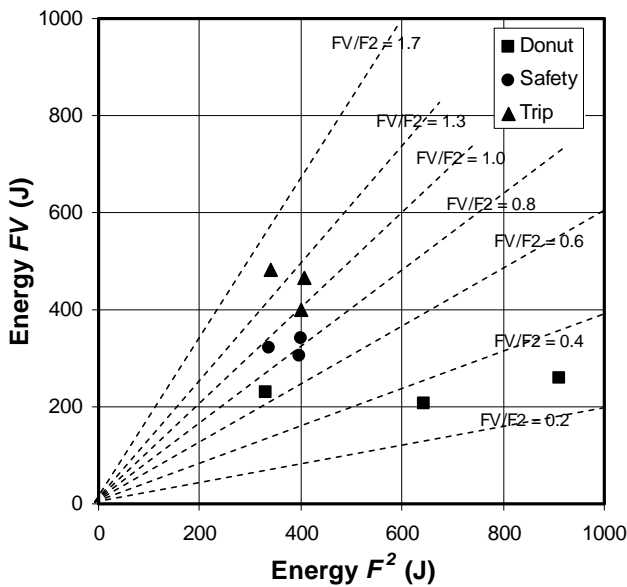
ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผล

Energy efficiency (%)	Donut	Safety	Trip
This research	49	75	95
US/North America	45	70-80	80-100
Japan	67	—	—
UK	—	50	60
China	50	—	—



รูปที่ 11 % standard deviation ของค้ำตอกและกรณีวิเคราะห์แบบต่างๆ

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พลังงานโดยวิธี FV และ F^2 ผลของค้ำตอกแบบโดนัทที่มีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องจากการวิเคราะห์แบบ F^2 ของค้ำตอกแบบนี้มี precision ต่ำ (ดังได้กล่าวไปแล้ว) สำหรับค้ำตอกแบบเซฟตี้และทริปมี สัดส่วนพลังงาน FV/F^2 อยู่ประมาณระหว่าง 0.8-1.4



รูปที่ 12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พลังงานโดยวิธี FV และ F^2

7. สรุปผลการทดสอบ

เนื่องจากยังไม่เคยมีการวัดค่าพลังงานในการทดสอบ SPT ที่ได้ จากเครื่องมือและวิธีการที่ใช้ในประเทศไทยงานวิจัยนี้จึงได้ พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบในการวัดพลังงานและทำการวัด พลังงานประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้ค้ำตอกชนิดต่างๆคือ โดนัท, เซฟตี้, และ ทริป ผลการทดสอบแสดงว่าปริมาณ พลังงานประสิทธิภาพของค้ำตอกโดนัท, เซฟตี้, และ ทริป เป็น 49%, 68%, และ 95% ตามลำดับ โดยพบว่าค่าพลังงานของการ ทดสอบ SPT ที่ปฏิบัติในประเทศไทยตรงกับขอบเขตของค่าที่ เสนอสำหรับ US/North America มากที่สุด ผลการวิจัยนี้จะ เป็นประโยชน์ในการปรับแก้ค่า Standard Penetration Test (SPT) ที่ได้จากการปฏิบัติในประเทศไทยให้เป็นค่าพลังงาน มาตรฐานเพื่อการ correlation ไปสู่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของ ดินที่ถูกต้องต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ ศกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (TRFMAG) (สัญญา เลขที่ MRG - OSMEP505E161) และขอขอบคุณ บริษัท จีไอ ฟิสิกส์ จำกัด ที่ได้ร่วมในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

9. บรรณานุกรม

- [1] วสท. (2548), ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง.
- [2] ASTM D1586 - Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils.
- [3] ASTM D4633 - Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers.
- [4] ASTM E456 - Standard Terminology Relating to Quality and Statistics.
- [5] ASTM E691 - Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method.
- [6] Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill.
- [7] BS 1377-9: Methods of test for soils for civil engineering purposes. In-situ tests.
- [8] Casagrande, A. & Casagrande, L. (1968). *Report to American Electric Power Service Corporation on Foundation Investigations for the Donald E. Cook Nuclear Power Plant.*



- [9] ENV1997: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 3: Design assisted by field testing.
- [10] ISO 22476-3: Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 3: Standard penetration test.
- [11] ISSMFE (1988). Standard penetration test (SPT): International Reference Test Procedure, *ISSMFE TC on Penetration Testing, Int Sym on Penetration Testing*, ISOPT-1, Vol.1, 3-26.
- [12] Kovacs, W.D., Griffith, A.H., & Evans, J. C. (1978). An Alternative to the Cathead and Rope for the Standard Penetration Test, *Geot Testing J*, ASTM, Vol.1, No.2, 72-89.
- [13] Kovacs, W.D. & Salomone, L.A. (1982). SPT hammer energy measurement, *J of Geotech Eng Div*, ASCE, Vol.108, No.GT4, 599-620.
- [14] Kovacs, W.D., Yokel, F.Y., Salomone, L.A., & Holtz, R.D. (1984). Liquefaction potential and the international SPT, *Proc. 8th World Conf on Earthquake Eng*, San Francisco, Vol.3, pp. 263-268.
- [15] McLean, F.G., Franklin, A.G., & Dahlstrand, T.K. (1975). Influence of Mechanical Variables on the SPT, *Proc. of Specialty Conf on In Situ Measure of Soil Prop*, ASCE, Vol.1, 287-318.
- [16] Pile Dynamics, Inc. (2008), *SPT Analyzer*.
- [17] Robertson, P.K., Campanella, R.G., & Wightman, A. (1983). SPT-CPT correlations, *J of Geotech Eng*, ASCE, Vol.109, 1449-1459.
- [18] Schmertmann, J.H. (1975). Measurement of In Situ Shear Strength, *Proc. of Specialty Conf on In Situ Measure of Soil Prop*, ASCE, Vol.2, 57-138.
- [19] Schmertmann, J.H. (1978). Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties? – Yes, But ...!, *Dynamic Geotech Testing*, ASTM STP 654, 341-355.
- [20] Schmertmann, J.H. & Smith, T.V. (1977). A Summary of SPT Energy Calibration Services Performed for the Florida DOT, *Final Research Report 245-D73*.
- [21] Schmertmann, J.H. & Palacios, A. (1979). Energy dynamics of SPT, *J of Geotech Eng Div*, ASCE, Vol.105, No.GT8, 909-926.
- [22] Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., & Chung, R.M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, *J of Geotech Eng*, ASCE, Vol.111, No.12, 1425-1445.
- [23] Skempton, A.W. (1986). Standard penetration test procedures and effects in sand of overburden, relative density, particle size, aging, and over-consolidation, *Geotechnique*, Vol.36, 425-447.
- [24] Testconsult Limited (2010), *SPT Hammer Energy Analyzer*.
- [25] Youd, T.L. & Bennett, M.J. (1981). Liquefaction Site Studies Following the 1979 Imperial Valley Earthquake, *ASCE Annual Convention and Exposition*, St. Louise, Mo.