บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย อุปกรณ์และวิธีการที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุ การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย การทดสอบการเกิดความร้อนของคอนกรีตสด การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และการทดสอบความทนทานของคอนกรีต ได้แก่ การทดสอบความต้านทานคลอไรด์ อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการหดตัวแห้งของคอนกรีต ซึ่งแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 เถ้าชานอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล T.N. จังหวัดลพบุรี

3.1.3 มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนย่อยขนาดไม่เกิน 3/4 นิ้ว

3.1.4 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่สะอาด ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

3.1.5 สารลดน้ำพิเศษ (Superpasticizer)

3.1.6 น้ำ

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 เครื่องบดแบบตกกระทบ

3.2.2 ตู้อบ

3.2.3 แบบชุดทดลองหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

3.2.4 เครื่องผสมคอนกรีต

3.2.5 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.

3.2.6 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 45 ซม. สูง 45 ซม.

3.2.7 แบบหล่อแท่งคอนกรีตขนาด กว้าง 7.5 ซม. สูง 7.5 ซม. ยาว 28.5 ซม.

3.2.8 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.2.9 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

3.2.10 เครื่องมือทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต

3.2.11 เครื่องทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต

3.2.12 เครื่องทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.2.13 ชุดทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีต

3.2.14 เครื่องมือบันทึกอุณหภูมิของคอนกรีต

3.2.15 สายวัดอุณหภูมิ (ThermoCouple)

3.2.16 เครื่องเจียรสำหรับตัดแท่งคอนกรีต

3.3 วิธีการศึกษา

3.3.1 การเตรียมเถ้าชานอ้อย

นำเถ้าชานอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล T.N. ในจังหวัดลพบุรี มาอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำเถ้าชานอ้อยที่แห้งแล้วมาร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกเอากากชานอ้อยและสิ่งเจือปนอื่นๆ ออก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการทำให้เถ้าชานอ้อยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) แตกต่างกัน โดยการนำมาลอยน้ำเพื่อทำการแยกเถ้าชานอ้อยออกเป็น 2 ชนิด คือ เถ้าชานอ้อยชนิดจมน้ำ และเถ้าชานอ้อยชนิดลอยน้ำ จากนั้นทำการอบเพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จนเถ้าชานอ้อยแห้งสนิท หลังจากนั้นนำเถ้าชานอ้อยแต่ละส่วนทำการทดสอบเพื่อหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ซึ่งจะได้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำเถ้าชานอ้อยมาผสมกันเพื่อให้มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 10±2, 15±2 และ 20±2 โดยน้ำหนัก เถ้าชานอ้อยที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 10.9 ได้จากเถ้าชานอ้อยที่จมน้ำ และค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 16.1ได้จากเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้าโดยตรง ส่วนเถ้าชานอ้อยที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 20.0 โดยน้ำหนัก ได้จากการผสมระหว่างเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้าโดยตรงในปริมาณร้อยละ 85 โดยน้ำหนักและเถ้าชานอ้อยที่ลอยน้ำในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเถ้าชานอ้อยทั้งหมดไปบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบจนมีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าชานอ้อยแต่ละชนิด (%)

ชนิดเถ้าชานอ้อย	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา
เถ้าชานอ้อยที่จมน้ำ	10.9 (%)
เถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงไฟฟ้าโดยตรง	16.1 (%)
เถ้าชานอ้อยที่ลอยน้ำ	58.3 (%)

3.3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) แตกต่างกันคือ ร้อยละ 10.9, 16.1 และ 20.0 โดยน้ำหนัก นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 400 กก/ม^3 มีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และมีค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ในช่วง 15 - 20 ซม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (Supperplasticizer) เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตโดยส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 หลังจากทำการเทคอนกรีตลงในแบบครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบตัวอย่างคอนกรีต แล้วนำไปบ่มในน้ำเพื่อทดสอบคอนกรีตตามอายุคอนกรีตในแต่ละการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

MIX	Mix Proportion (kg/m^3)							W/B	Slump (cm)
	Cement	BA	Sand	Lime stone	Effective water	Mixing water	Super P		
CT	400	0	879	918	180	192	2.44	0.45	17.0
10BA50	200	200	847	884	180	191	4.41	0.45	19.0
10BA65	140	260	836	873	180	191	6.00	0.45	18.5
10BA80	80	320	828	864	180	191	8.36	0.45	19.0
15BA50	200	200	847	884	180	191	6.33	0.45	18.5
15BA65	140	260	836	873	180	191	7.52	0.45	18.0
15BA80	80	320	828	864	180	191	9.26	0.45	19.0
20BA50	200	200	847	884	180	191	7.40	0.45	17.0
20BA65	140	260	836	873	180	191	8.68	0.45	17.5
20BA80	80	320	828	864	180	191	10.44	0.45	18.0

<u>หมายเหตุ</u> CT = Concrete Control, BA = Bagasse Ash

XXBAYY XX คือ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ได้แก่ ร้อยละ 10±2, 15±2 และ 20±2

YY คือ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตัวอย่างเช่น 15BA65 คือ คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.3.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อย ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2014) โดยเป็นการหาอัตราส่วนของน้ำหนักวัสดุในอากาศต่อน้ำหนักของน้ำ

3.3.3.2 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 127 (2012) และ ASTM C 128 (2012) ตามลำดับ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของมวลรวมคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาณเนื้อแท้ของมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน และได้ทำการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการดูดซึมน้ำเข้าไปเก็บไว้ในมวลรวม

3.3.3.3 การทดสอบขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2006) โดยมวลรวมละเอียดใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด 3", 4, 8, 16, 30, 50, 100 และถาด ส่วนมวลรวมหยาบใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด 3", 1½", ½", ¾", 3/8", ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100 และถาด และคำนวณค่าโมดูลัสความละเอียดจากผลรวมร้อยละค้างสะสมบนตะแกรงเบอร์ต่างๆ หาร 100

3.3.3.4 ทดสอบหาความละเอียดของเถ้าชานอ้อยบดละเอียด โดยวิธีหาน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C 430 (2008)

3.3.3.5 ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดด้วยเครื่อง Mastersize S Ver. 2.15

3.3.3.6 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าชานอ้อยอ้อยบดละเอียดโดยใช้เครื่องถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.3.7 ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อย โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscope

3.3.4 การทดสอบความร้อนของคอนกรีตสด

ทำการทดสอบโดยดำเนินการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ Thermocouple ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบหล่อคอนกรีตที่มีขนาด 45 × 45 × 45 ซม. ซึ่งทำการบุฉนวนด้วยโฟมด้านละ 10 ซม. (ตัวอย่างคอนกรีตมีขนาด 25 x 25 x 25 ซม.) จากนั้นปิดฝาแบบหล่อให้สนิท และทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุกๆ 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มหล่อตัวอย่างจนถึงเวลา 168 ชั่วโมง

3.3.5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

3.3.5.1 กำลังอัดของคอนกรีต ทำการทดสอบที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม.และ สูง 20 ซม. หลังจาก 24 ชั่วโมงทำการถอดแบบหล่อคอนกรีตแล้วนำไปบ่มน้ำ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด สอบตามมาตรฐาน ASTM C 39 (2014) โดยทำการทดสอบ 3 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.3.5.2 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. หลังจาก 24 ชั่วโมงถอดแบบแล้วนำไปบ่มน้ำ ทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน ด้วยวิธีแรงดึงผ่าซีกตามมาตรฐาน ASTM C 496 (2011)

3.3.5.3 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยใช้อุปกรณ์วัดการยืดหด (Compressometer) ติดเข้ากับแท่งตัวอย่างคอนกรีต ทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน ในงานวิจัยใช้ก้อนตัวอย่างขนาดเล็กกว่ามาตรฐานคือใช้คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 469 (2014)

3.3.6 การทดสอบความทนทานของคอนกรีต

3.3.6.1 การทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบได้จากการตัดแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่บ่มในน้ำจนมีอายุ 28 และ 90 วัน ตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความสูง ให้ได้เป็นก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 5 ซม. จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ 24 ชั่วโมงเพื่อให้แห้งสนิท จึงเคลือบผิวด้วยซิลิโคน โดยเหลือพื้นที่ผิวเปิดไว้ 2 ด้านเพื่อเป็นด้านสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl 3%) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (3N NaOH) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (2012)

จำนวนคูลอมป์ วัดได้จากการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีแรงดัน 60 โวล์ต ผ่านตัวอย่างคอนกรีต โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และคำนวณค่าความต้านทานคลอไรด์ตามสมการ 3.1

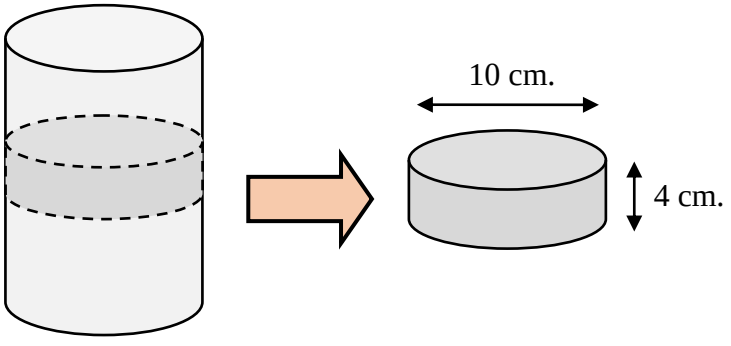
$$Q = 900(I_0+2I_{30}+2I_{60}+2I_{90}+.....2I_{300}+2I_{330}+I_{360}) \quad (3.1)$$

โดยที่ Q คือ ประจุไฟฟ้าทั้งหมดไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (Coulomb)

I_0 คือ ค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาเริ่มต้น (Amp.)

It คือ ค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาเวลาใดๆ (Amp.)

3.3.6.2 การทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอาศัยวิธีการไหลคงที่ (Steady Flow Method) ทดสอบโดยการให้น้ำที่มีแรงดันคงที่ไหลผ่านคอนกรีตในทิศทางเดียว ทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน โดยนำตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. นำขึ้นจากบ่อบ่มก่อน 2 วัน เพื่อนำก้อนคอนกรีตมาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่าง ดังรูป 3.1 เพื่อหลีกเลี่ยงคอนกรีตส่วนบนที่มีผลกระทบที่เกิดจากการเยิ้มน้ำซึ่งเป็นส่วนที่มีกำลังต่ำและมีความพรุนสูง และคอนกรีตส่วนล่างที่มีมวลรวมมากเกินไปจากการกระทุ้งแน่น ให้มีขนาดความสูง 4 ซม. จากนั้นทำความสะอาดผิวด้านข้างของก้อนคอนกรีต ให้มีความสะอาด เพื่อให้ผิวคอนกรีตสามารถยึดติดกับอีพ็อกซี่ได้ และบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตเพื่อป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปอุดตันการไหลของน้ำบริเวณผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีต จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบมาทำการหล่ออีพ็อกซี่ ในด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีตให้มีความหนา 2.5 ซม. จากผิวด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีตและสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างคอนกรีต โดยก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะต้องอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของแบบหล่อ อีพ็อกซี่ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่สามารถรับแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดสอบได้โดยไม่เกิดการยุบตัว และมีสีใสสามารถมองเห็นบริเวณผิวด้านข้างของก้อนตัวอย่างได้เพื่อตรวจสอบการรั่วซึมน้ำ หลังจากหล่ออีพอกซีเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตมาประกอบเข้ากับชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต มีความดันน้ำคงที่เท่ากับ 5 bars หรือ 0.5 MPa (Chan และ Wu, 2000) เพื่อให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต ทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตและเวลา จนอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าคงที่ จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสะสมที่ไหลผ่านคอนกรีตกับเวลา นำค่าความชันจากสมการพยากรณ์เชิงเส้นตรง (Linear Regression Equation) ซึ่งเป็นค่าอัตราการไหลของน้ำ (Q) มาแทนค่าในสมการ Darcy's law (3.1) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (Ludirdja และคณะ, 1989)

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \tag{3.1}$$

เมื่อ K = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (m/sec)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m/sec^2)

Q = อัตราการไหลของน้ำ (m^3/sec)

L = ความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (m)

P = แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (N/m^2)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (m^2)

3.3.6.3 การหดตัวแห้งของคอนกรีตโดยใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5×7.5×28.5 ซม. ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 157 (2008) และ ASTM C 490 (2011) ทำการถอดแบบคอนกรีตหลังจากหล่อแท่งคอนกรีตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำเป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากบ่อบ่มเช็ดด้วยผ้าให้ตัวอย่างคอนกรีตชุ่มน้ำพอหมาดๆ แล้วทำการวัดความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทันที หลังจากนั้นนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ไว้ในตู้ซึ่งควบคุมอุณหภูมิภายในให้มีค่า 23±2 องศาเซลเซียส และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้มีค่าร้อยละ 50±5 จากนั้นวัดการหดตัวแห้งของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ไว้ในตู้ทุกๆ 14 วันจนอายุครบ 182 วัน โดยใช้ไดอัลเกจแบบอนาล็อคที่สามารถวัดค่าความละเอียดได้ถึง 0.0001 นิ้ว คำนวณค่าการหดตัวแห้งดังสมการที่ (3.2)

$$L = \frac{Li - Lx}{Lg} \tag{3.2}$$

โดยที่ L คือ ค่าการหดตัวแห้ง ($\times 10^{-6}$ นิ้ว/นิ้ว)

Lx คือ ค่าความยาวที่เวลาใดๆ

Li คือ ค่าความยาวที่อายุเริ่มต้น

Lg คือ ค่าระยะพิกัด (Gauge length)