การนำเถ้าหนักลิกไนต์มาแทนที่ดินลูกรังในชั้นรองพื้นทาง

Replacing Laterite with Lignite Bottom Ash in Subbase Course

เกรียงไกร เพ็ชรแบน วรุตม์ เสรยางกูร วิทูรย์ แก้วมณี และอรรณพ สมาธิ[1] นิรชร พึ่งแดง[2]

บทคัดย่อ

การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของดินลูกรังระหว่างตัวอย่างทดสอบดินลูกรังล้วน กับตัวอย่างทดสอบเถ้าหนักลิกไนต์แทนที่ดินลูกรังที่ปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ โดยใช้แหล่งเถ้าหนักลิกไนต์จากบริษัททอรัส ปอสล์โซลาน จำกัด

ดินลูกรังคือวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนอย่างกว้างขวาง ค่าความแข็งแรงของวัสดุดินลูกรังหาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ CBR โดยอาศัยวิธีการบดอัดอย่างสม่ำเสมอและควบคุมปริมาณความชื้นอย่างเหมาะสม รวมไปถึงคุณสมบัติของดินลูกรังที่ใช้ก่อสร้างแหล่งนั้นๆ ด้วย

จากการทดสอบพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ CBR ของตัวอย่างทดสอบดินลูกรังผสมเถ้าหนักลิกไนต์สูงกว่าตัวอย่างทดสอบดินลูกรังล้วน ขณะเดียวกันการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 26 จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ CBR สูงที่สุด และถ้าแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ CBR ค่อยๆ ลดลงตามลำดับ

คำสำคัญ : เถ้าหนักลิกไนต์, ชั้นรองพื้นทาง

คำนำ

ปัญหาของประเทศที่กำลังพัฒนาปัญหาหนึ่งคือภาวะวิกฤตการณ์ทางเศรษฐกิจ ประเทศไทยก็เป็นประเทศที่ประสบปัญหาดังกล่าว หนทางที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้วัสดุท้องถิ่น เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าก่อสร้างและใช้ประโยชน์จากวัสดุท้องถิ่นให้ได้มากที่สุดเถ้าหนักลิกไนต์เป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดมลภาวะ ถึงแม้ว่าจะเป็นสารปอซโซลานหรือสารซิลิเซียสหรืออะลูมิโน-ซิลิเซียส ซึ่งไม่มีคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานอยู่ในตัวหรือมีน้อยมาก แต่หากมีความละเอียดสูงและมีความชื้นเพียงพอก็จะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับด่างทำให้ได้สารใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน

ดังนั้น ในต่างประเทศได้นำไปใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมหลายรูปแบบในประเทศไทยได้มีการตื่นตัวในการนำมาใช้อย่างจริงจังตั้งแต่ปี พ.ศ.2535 เนื่องจากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางและในแต่ละปีเถ้าหนักลิกไนต์จะถูกนำมาทิ้งในปริมาณปีละ 3 ล้านตัน โครงการนี้ได้เล็งเห็นถึงปัญหาทางเศรษฐกิจและปัญหามลภาวะอันเนื่องมาจากเถ้าถ่านหินในประเทศไทย จึงได้ทำการศึกษาถึงการนำเถ้าหนักลิกไนต์มาผสมกับดินลูกรังเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางซึ่งอาจจะช่วยส่งผลให้มีการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนในระยะยาว

[1]นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังและเถ้าหนักลิกไนต์
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรัง
3. เพื่อหาอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรังที่เหมาะสมในงานชั้นรองพื้นทาง

ตรวจเอกสาร

นิรชร นกแก้ว (2539) ได้นำเถ้าหนักลิกไนต์ซึ่งเป็นผลิตผลพลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์มาผสมแทนมวลรวมละเอียดใน Hot Bin 1 เพื่อลดปริมาณการใช้หินฝุ่นซึ่งเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแอสฟัลต์คอนกรีตลง โดยใช้กับวัสดุมวลรวม 2 ชนิด คือ หินปูนและหินบะซอลท์ ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60 - 70 ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต จะพบว่าอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าหนักลิกไนต์ที่เหมาะสมที่ใช้ผสมลงแทนในอัตราส่วนเถ้าหนักลิกไนต์ต่อหินฝุ่นใน Hot Bin 1 ที่ Min Proportion 1 : 2 : 3 : 4 ของหินปูน เท่ากับ (2 : 45) : 28 : 11 : 14 และ (2 : 44) : 29 : 11 : 14 และของหินบะซอลท์เท่ากับ (2 : 46) : 17 :15 : 20 และ (2 : 45) : 18 : 15 : 20 ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ของหินปูนและหินบะซอลท์เท่ากับ 6.2 และ 7.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวม ตามลำดับ มีผลทำให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตสอดคล้องตามเกณฑ์กำหนด เถ้าหนักที่ผสมแทนหินฝุ่นของหินทั้ง 2 ชนิดที่ปริมาณดังกล่าว มีผลทำให้ดัชนีความแข็งมีค่าเท่ากับ 81, 85, 85 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามเกณฑ์กำหนด

Chapman, B.R. และ Youdale, G.P. (1982) ได้กล่าวถึงแหล่งวัสดุที่ลดลงอย่างรวดเร็วของวัสดุการทางตามธรรมชาติและความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นของพลังงานจากสถานีพลังงานความร้อน การพิจารณาจะเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างโดยใช้วัสดุที่เหลือใช้ซึ่งเป็นของเสีย เพื่อเป็นการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมและเพื่อประโยชน์ต่อชุมชน จากการทดลองคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเถ้าหนัก (Bottom Ash) จาก Munmorah Power Station จะแสดงให้เห็นว่าเถ้าหนักเป็นวัสดุรองพื้นทางที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ในสภาพธรรมชาติและโดยการปรับปรุงกับหินปูนใช้เป็นวัสดุพื้นทางได้อย่างดีเยี่ยม

อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. เถ้าหนักลิกไนต์ จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าที่จังหวัดระยอง
2. ดินลูกรัง จากจังหวัดสระบุรี
3. น้ำสะอาด จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วิธีการทดสอบ

1. การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังและเถ้าหนักลิกไนต์
   - Liquid Limit
   - Plastic Limit และ Plasticity Index
   - Sieve Analysis
   - Los Angeles Abrasion by Coarse Aggregate
2. การทดสอบคุณสมบัติของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรัง
   - Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน
   - California Bearing Ratio แบบแช่น้ำ
3. การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรังหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม
4. หาค่า CBR ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีคุณสมบัติให้เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดสำหรับชั้นรองพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ผลการทดสอบและวิจารณ์

1.การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง

- ผลการทดสอบหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรัง ผลการทดสอบมีค่าร้อยละ 34.25 โดยมีเกณฑ์ยอมรับกำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 35 ดังตารางที่ 1

- ผลการทดสอบหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังมีค่าเท่ากับร้อยละ 30.01 และ 4.24 โดยที่เกณฑ์ยอมรับกำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 11 ดังตารางที่ 1
- ผลการทดสอบหาขนาดคละของดินลูกรัง ผลการทดสอบนี้จะนำไปใช้ในการกำหนดเกรดของดินลูกรัง เพื่อใช้ในการทดสอบค่าความสึกหรอ และใช้ในการเลือกวิธีที่จะใช้ทดสอบ Compaction ดังตารางที่ 1
- ผลการทดสอบความสึกหรอของดินลูกรังมีค่าเท่ากับร้อยละ 33.37 ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ยอมรับตามมาตรฐานที่กำหนดให้ค่าความสึกหรอต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 60 ดังตารางที่ 1

2. การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าหนักลิกไนต์
   - ผลการทดสอบค่า Liquid Limit Plastic Limit และ Plasticity Index ในการทดสอบนี้ไม่สามารถหาคุณสมบัติดังกล่าวได้ เนื่องจากเถ้าหนักลิกไนต์เมื่อเติมน้ำเข้าไปจะไม่จับตัวกัน
   - ผลการทดสอบหาขนาดคละของเถ้าหนักลิกไนต์ โดยเถ้าหนักลิกไนต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 35 และไม่สามารถหาค่า Liquid Limit plastic Limit และ Plasticity Index ได้ ดังนั้นหากเปรียบเทียบเฉพาะคุณสมบัติดังกล่าวเถ้าหนักลิกไนต์จึงมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับทรายมากที่สุด ดังตารางที่ 1
   - ค่าความสึกหรอ จากการทดสอบหาขนาดคละของเถ้าหนักลิกไนต์ โดยพิจารณาจากร้อยละของการผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และ เบอร์ 40 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 92 และ 76 ดังตารางที่ 1 ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทดสอบหาค่าความสึกหรอ เพราะมีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 12 มาก

2. การทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรัง
   - ผลการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรังในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 ซึ่งความหนาแน่นแห้งจะลดน้อยลงตามอัตราส่วนร้อยละของการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรังดังรูปที่ 1 และค่าความชื้นจะเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2 กล่าวคือ ถ้าเถ้าหนักลิกไนต์มีการดูดซึมน้ำมากก็จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งลดลงด้วย
   - ผลการทดสอบ California Bearing Ratio แบบแช่น้ำ (Soaked) ของทุกอัตราส่วนผสมมีค่าการขยายตัวน้อยมากซึ่งงานชั้นรองพื้นทางไม่ได้ระบุถึงข้อกำหนดดังกล่าว ส่วนค่า CBR ของดินลูกรังล้วนเท่ากับร้อยละ10.50 และที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3 นำค่าที่ทดสอบได้มาหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3 อัตราส่วนผสมของเถ้าหนักลิกไนต์ที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 26 ซึ่งจะได้ค่า Optimum Water Content เท่ากับร้อยละ 14.50 ดังรูปที่ 2 และได้ค่า CBR เท่ากับร้อยละ 29 โดยที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 25

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินลูกรังและเถ้าหนักลิกไนต์

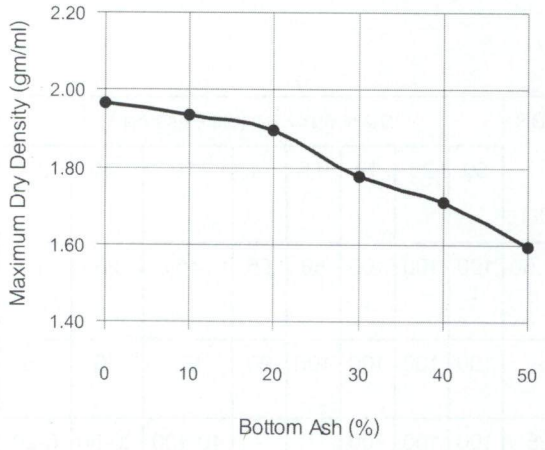
วัสดุตัวอย่าง	ATTERBERG LIMITS			ค่าความสึกหรอ	CBR	ขนาดส่วนคละ (% Passing)							
	L.L. (%)	P.L. (%)	P.I. (%)	(%)	(%)	50	25	19	9.5	#4	#10	#40	#200
ดินลูกรัง (Grade E)	34.25	30.01	4.24	33.37	10.50	100	100	100	86	65	45	26	13
เถ้าหนักลิกไนต์	-	-	-	-	-	100	100	100	100	98	92	76	15
ข้อกำหนดเกรด E	35	11	11	60	25	100	100	100	-	-	40-100	20-50	6-20

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ Compaction Test

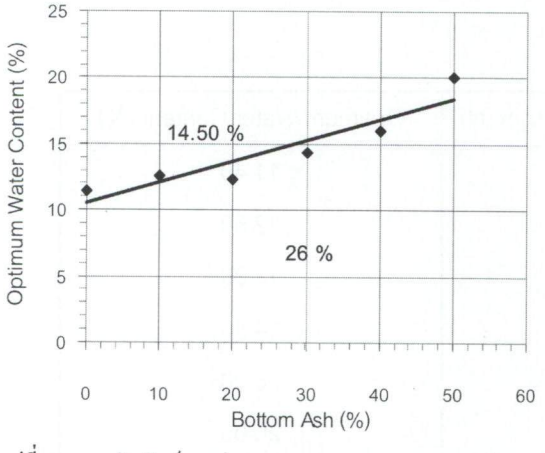
เถ้าหนักลิกไนต์ (%)	Maximum Dry Density (gm/ml)	Optimum Water Content (%)
0	1.964	11.40
10	1.934	12.60
20	1.895	12.30
30	1.775	14.40
40	1.708	16.00
50	1.593	20.00

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ California Bearing Ratio Test

เถ้าหนักลิกไนต์ (%)	CBR (%)	Water Content (%)	Swell (%)
0	10.50	11.50	0.72
10	22.40	12.23	0.56
20	32.00	12.95	0.40
30	28.00	16.63	0.36
40	19.50	17.13	0.30
50	17.00	20.13	0.09



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Dry Density กับ Bottom Ash

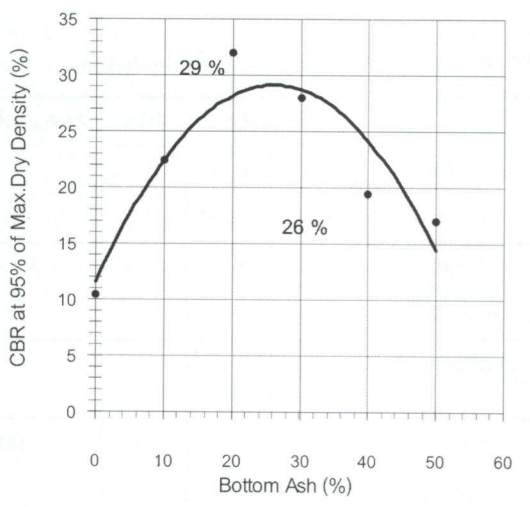


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Optimum Water Content กับ Bottom Ash

สรุปผล

จากการศึกษาคุณสมบัติของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรัง ได้ผลสรุปดังนี้

1. คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักลิกไนต์และดินลูกรัง
   - Liquid Limit Plastic Limit และ Plasticity Index ของเถ้าหนักลิกไนต์ ไม่สามารถทำการทดสอบหาค่าดังกล่าวได้ เนื่องจากเถ้าหนักลิกไนต์ไม่มีคุณสมบัติการยึดประสานกันในสภาวะเหลว ส่วนดินลูกรังมีค่าอยู่ในเกณฑ์กำหนด
   - ขนาดคละของเถ้าหนักลิกไนต์ จัดอยู่ในกลุ่มของของดินเม็ดละเอียด ส่วนดินลูกรังมีขนาดคละอยู่ในเกณฑ์กำหนดของชั้นรองพื้นทาง
   - ค่าความสึกหรอของเถ้าหนักลิกไนต์ ไม่จำเป็นต้องทดสอบเพราะเมื่อพิจารณาที่ขนาดส่วนคละของเถ้าหนักลิกไนต์ ซึ่งมีความละเอียดกว่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 12 ส่วนดินลูกรังมีค่าอยู่ในเกณฑ์กำหนด



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR at 95% of Maximum Dry Density กับ Bottom Ashผป

2. การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรัง
   - ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเถ้าหนักลิกไนต์ผสมดินลูกรังที่บดอัดแล้ว จะมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าหนักที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าหนักลิกไนต์มากจึงทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง
   - California Bearing Ratio ของเถ้าหนักลิกไนต์ผสมดินลูกรัง จากการนำดินลูกรังล้วนไปทำการทดสอบซึ่งค่าที่ได้ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด เมื่อแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ลงไปทำให้มีค่า CBR เพิ่มขึ้นจากเดิมจนอยู่ในเกณฑ์กำหนด

หลังจากนั้นค่า CBR จะลดลงตามปริมาณของเถ้าหนักลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังให้ค่าCBR มากกว่าดินลูกรังล้วน ดังนั้นเถ้าหนักลิกไนต์จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาแทนที่ในดินลูกรัง

3. อัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรังที่เหมาะสมในงานชั้นรองพื้นทาง
   - อัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักลิกไนต์ในดินลูกรังที่เหมาะสมในงานชั้นรองพื้นทางคือร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก จึงทำให้คุณสมบัติต่างๆของดินลูกรังสอดคล้องตามเกณฑ์กำหนด

ข้อเสนอแนะ

การใช้เถ้าหนักลิกไนต์แทนที่ดินลูกรังในอัตราส่วนที่เหมาะสมประมาณร้อยละ 20 - 30 โดยน้ำหนัก จะเป็นการช่วยลดปริมาณดินลูกรังลงได้จำนวนหนึ่ง ซึ่งจะเหมาะสมเฉพาะงานทางที่อยู่ใกล้แหล่งที่มีเถ้าหนักลิกไนต์จึงจะคุ้มราคาก่อสร้าง ทั้งนี้การใช้เถ้าหนักลิกไนต์แทนที่ดินลูกรังควรจะตรวจสอบปริมาณน้ำที่ทำให้ดินแน่นสุดและความหนาแน่นแห้งใหม่อีกครั้งเพราะในการทดสอบนี้ได้ใช้ตัวอย่างดินที่มีคุณสมบัติต่างๆ ค่าหนึ่งเท่านั้น ไม่ได้ครอบคลุมดินที่มีคุณสมบัติต่างไปจากนี้ ซึ่งการนำไปใช้จะต้องตรวจสอบว่าปริมาณดินที่ลดลงไปนั้นคุ้มค่าหรือไม่กับการที่จะต้องเพิ่มปริมาณน้ำ ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกใช้เถ้าหนักลิกไนต์แทนที่ดินลูกรัง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์รัฐพล สมนา ผู้ประสานงานด้านวัสดุเถ้าหนักลิกไนต์ ขอขอบคุณ บริษัท ทอรัส ปอสล์โซลาน จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุเถ้าหนักลิกไนต์ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำนวยความสะดวกในการทดสอบจนสำเร็จด้วยดี

บรรณานุกรม

[1] นิรชร นกแก้ว. 2539. การศึกษาการใช้เถ้าหนักลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] นิรชร พึ่งแดง. 2548. การทดสอบวัสดุการทาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : ศูนย์ปฏิบัติการเทคโนโลยีการพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[3] วรากร ไม้เรียง และคณะ. 2525. ปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[4] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง. 2539. มาตรฐานงานทาง. กรุงเทพมหานคร:

[5] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง. 2543. มาตรฐานวิธีการทดลอง. กรุงเทพมหานคร:

ประวัติผู้เขียนบทความ

ชื่อ: นิรชร พึ่งแดง

การศึกษา:

วศ.ม (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

วศ.บ (วิศวกรรมโยธา) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

ตำแหน่ง:

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8

ผลงานทางวิชาการ:

วัสดุการทาง ISBN 974-625-279-8

วิศวกรรมการทาง ISBN 974-416-832-3

การทดสอบวัสดุการทาง ISBN 974-416-943-5

เว็บไซต์

http://www.en.rmutt.ac.th/highway/

http://www.se-ed.net/highway/

ผลงานการวิจัย:

- การศึกษาการใช้ผ้าใบไทร์คอร์ดเก่าในแอสฟัลต์คอนกรีต (A Study of Using Waste Tire Cord Fabric in Asphalt Concrete) บทคัดย่อการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11 "วิศวกรรมโยธาเพื่อการพัฒนาชุมชน" สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) และคณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 20-22 เมษายน 2549 หน้า 270

- การศึกษาการใช้ผ้าใบไทร์คอร์ดเก่าในแอสฟัลต์คอนกรีต (A Study of Using Waste Tire Cord Fabric in Asphalt Concrete) เรื่องเต็ม การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 44 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 30 มกราคม 2549-2 กุมภาพันธ์ 2549 เล่มที่ 5 หน้า 266-275
- การศึกษาการใช้เถ้าหนักลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต (A Study of Using Lignite Bottom Ash to Replace Fine Aggregate in Asphalt Concrete) วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 48 ปีที่ 16 ธันวาคม 2545-มีนาคม 2546 หน้า 115-129