พฤติกรรมการบดอัดของทรายหล่อแบบ และดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยทรายหล่อแบบ

Compaction Behavior of Waste Foundry Sand and Clay Stabilized with Waste Foundry Sand

วีรยา ฉิมอ้อย และณัฐวุฒิ จันทรถิระติกุล
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำทรายหล่อแบบกลุ่ม Green Sand Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์มาศึกษาพฤติกรรมการบดอัดเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานทาง และใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวมีพลาสติกซิตี้สูง (CH) ในสัดส่วนการแทนที่ 20, 40, 60 และ 80% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มไปประยุกต์ใช้ในงานทาง เนื่องจากมีคุณสมบัติผ่านตามมาตรฐานโดยกลุ่ม GSW มีค่า CBR แบบแช่น้ำทางด้านแห้ง (-2% จาก OMC) และด้านเปียก (+2% จาก OMC) เท่ากับ 16.02% และ 11.13% มีการบวมตัวที่ 4 วันทั้งด้านแห้งและด้านเปียกอยู่ที่ 1.53% และ 0.73% ส่วนกลุ่ม SSW มีค่า CBR แบบแช่น้ำทางด้านแห้งและด้านเปียกเท่ากับ 24.84% และ 4.72% มีการบวมตัวทางด้านแห้งเท่ากับ 0.58% ทางด้านเปียกไม่มีการบวมตัว ส่วนดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมกับทรายหล่อแบบนั้นพบว่าผลจากการเพิ่มปริมาณของทรายหล่อแบบส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น, ค่า OMC ลดลง, ค่า CBR แบบแช่น้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การบวมตัวลดลง

คำสำคัญ: ทรายหล่อแบบ การบดอัด ดินเหนียว

Abstract

This research studied the compaction behavior of Green Sand Waste (GSW) and Shell Sand Waste (SSW) which were by-products from engine parts casting industry in order to use them as highway materials. In addition, a potential to be used as admixtures for a high plasticity clay (CH) was investigated by varying mixing ratio by weight from 20, 40, 60 to 80%. From the results, it is possible to use both waste foundry sands for highway construction materials since their properties satisfy with the standard. The soaked CBR values of GSW

on dry side (-2% from OMC) and wet side (+2% from OMC) were 16.02% and 11.13% respectively and the swelling in 4 days were 1.53% for dry side and 0.73% for wet side. The soaked CBR values of SSW on dry side and wet side were 24.84% and 4.72% respectively and the swelling in 4 days were 0.58% for dry side and 0% for wet side. For clay improved by waste foundry sand, it was found that the increasing of both waste foundry sand increased the maximum dry density, decreased the optimum moisture content, slightly increased the soaked CBR values and decreased the percent swelling.

Keywords: waste foundry sand, compaction, clay

1. บทนำ

ทรายหล่อแบบ (Foundry Sand)โดยทั่วไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กและชิ้นส่วนรถยนต์ โดยใช้ในการทำแบบหล่อทรายด้วยการผสมทรายซิลิก้า (Silica) กับสารเพิ่มเติม (Additives) ที่ทำหน้าที่ประสานให้ขึ้นรูปได้และเบนโทไนท์ (Bentonite) คุณสมบัติของทรายหล่อแบบที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Waste Foundry Sand) ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเพิ่มเติม ซึ่งจะแตกต่างกันในกระบวนการหล่อและกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงาน สำหรับในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ทรายหล่อแบบที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถจำแนกตามสายการผลิตออกเป็น 3 กลุ่ม คือ จากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกได้ทรายหล่อแบบกลุ่ม Green Sand Waste (GSW) จากกระบวนการทำแบบหล่อภายใน (ไส้แบบ) ได้ทรายหล่อแบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และจากการตบแต่งชิ้นส่วนได้ทรายหล่อแบบกลุ่ม Finishing Waste (FW) ซึ่งทรายหล่อแบบที่ผ่านการใช้งานแล้วเหล่านี้ในแต่ละปีมีจำนวนหลายพันตันและโดยทั่วไปแล้วจะถูกกำจัดด้วยวิธี การฝังกลบซึ่งไม่เกิดประโยชน์เท่าที่ควร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำทรายหล่อแบบที่ผ่านการใช้งานแล้วซึ่งจัดเป็นของเสียทั่วไป (Non–Hazardous Waste) ไม่อยู่ในข่ายของเสียอันตราย [1] มาทำการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับงานทาง โดยใช้เป็นวัสดุถมคันทางโดยตรง รวมถึงใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยการผสมกับดินเหนียวมีค่าพลาสติกซิตี้สูง (CH) เนื่องจากดินเหนียวเป็นดินที่มีข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรมเพราะความสามารถในการรับแรงแบกทานต่ำและยังเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้ง่ายเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวด้วยการผสมกับทรายหล่อแบบหรือการนำทรายหล่อแบบไปใช้งานโดยตรงนั้น จึงถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้ทรายหล่อแบบในงานด้านวิศวกรรมโยธา ทำให้ลดค่าใช้จ่ายและเป็นการนำของเสียมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อย่างคุ้มค่า อีกทั้งยังถือว่าเป็นการช่วยลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยดินเหนียวมีค่าพลาสติกซิตี้สูง (CH) ที่ระดับความลึก 4 เมตร ภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต และทรายหล่อแบบที่ผ่านการใช้งานแล้วกลุ่ม GSW และ SSW

ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหล่อ จากบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี

2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวและทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มทำได้โดยการทดสอบดังนี้

- การทดสอบพิกัด Atterberg (ASTM D 4318-84) ในส่วนการหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)
- การหาขนาดของเม็ดดิน (ASTM D 422-63)
- การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) (ASTM D 854-58)

2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม

โดยในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ทรายหล่อแบบและดินเหนียวผสมทรายหล่อแบบเพื่อเป็นวัสดุถมคันทาง โดยสัดส่วนการแทนที่ของทรายหล่อแบบกับดินเหนียว คือ 20, 40 , 60 และ 80 เปอร์-เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยสัดส่วนของดินเหนียวและทรายหล่อแบบแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของทรายหล่อแบบและดินเหนียวผสมทรายหล่อแบบ มีดังนี้

- การบดอัดดิน (Compaction) (ASTM D 698-70, D 1557-70) โดยทำการทดสอบแบบมาตรฐาน
- แคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (California Bearing Ratio, CBR) (ASTM D 1883) โดยทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked) และแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และทดสอบทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกที่เปอร์เซ็นต์ความชื้น ± 2% ของความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และมีความหนาแน่นแห้งอย่างน้อยที่ร้อยละ 95 ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\rho_{d(max)}$)แบบมาตรฐาน

ตารางที่ 1 สัดส่วนของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	CH (%)	GSW (%)	SSW (%)
CH	100	-	-
CH80-GSW20	80	20	-
CH60-GSW40	60	40	-
CH40-GSW60	40	60	-
CH20-GSW80	20	80	-
GSW	-	100	-
CH80-SSW20	80	-	20
CH60-SSW40	60	-	40
CH40-SSW60	40	-	60
CH20-SSW80	20	-	80
SSW	-	-	100

2.3 มาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบ

มาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติของทรายหล่อแบบและดินเหนียวผสมทรายหล่อแบบว่ามีคุณสมบัติเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุถมคันทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวง[2,3]และกรมทางหลวงชนบท [4] แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 มาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบ

มาตรฐาน / **คุณสมบัติ**	**ดินถมคันทาง** ทล.-ม. 102/2532	**วัสดุถมคันทาง** มทช. 201-2545	**ทรายถมคันทาง** ทล.-ม. 103/2532
Non-Plastic	-	-	√
ผ่าน #200 (%)	-	-	⊁ 25
Dry density (kg/m³)	1,440*	-	-
CBR (%)	-	⊀ 4*	⊀ 10**
การบวมตัว (%)	⊁ 4*	⊁ 4*	-

หมายเหตุ: *ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบมาตรฐาน

**ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3. ผลของการศึกษาวิจัย

3.1 คุณสมบัติของทรายหล่อแบบและดินเหนียว

3.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

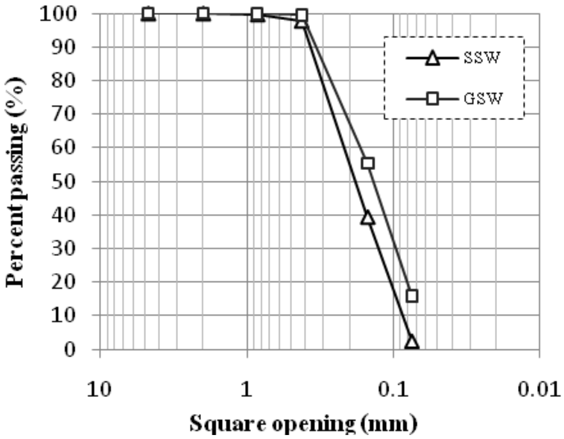
ลักษณะของทรายหล่อแบบมีความละเอียดมากจนเป็นผงฝุ่น โดยทรายกลุ่ม GSW ที่ผ่านการใช้งานจากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกจะมีลักษณะเป็นสีดำและมีกลิ่นฉุน ส่วนกลุ่ม SSW ที่ได้จากการทำแบบหล่อภายในจะมีสีน้ำตาลอ่อนและไม่มีกลิ่นดังรูปที่ 1

ผลการทดสอบพิกัด Atterberg พบว่าทรายกลุ่ม GSW มีค่าพิกัดเหลวและดัชนีพลาสติกเท่ากับ 42.5 % และ 20.4 % ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.4 ทั้งนี้เนื่องจากทรายกลุ่ม GSW มีเบนโทไนท์เป็นส่วนผสม ส่วนกลุ่ม SSW ไม่มีเบนโทไนท์เป็นส่วนผสม จึงไม่มีค่าพิกัดพลาสติก จึงจัด เป็นวัสดุประเภท Non–Plastic ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.57 ส่วนดินเหนียวมีค่าพิกัดเหลวเท่ากับ 65% และดัชนีพลาสติกเท่ากับ 38.1% ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66ส่วนผลของการหาขนาดของเม็ดดินพบว่าเปอร์เซ็นต์ผ่าน #200 ของทรายกลุ่ม GSW มีค่าเท่ากับ 15.85 % ส่วนกลุ่ม SSW มีค่าเท่ากับ 2.5 % โดยทรายกลุ่ม GSW มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่ากลุ่ม SSW โดยลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มแสดงดังรูปที่ 2 และคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว และทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่ม และการจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน USCS และตามมาตรฐาน AASHTO แสดงดังตารางที่ 3

(ก) ทรายหล่อแบบกลุ่ม GSW

(ข) ทรายหล่อแบบกลุ่ม SSW

รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของทรายหล่อแบบ



รูปที่ 2 การกระจายตัวของเม็ดดินของทรายหล่อแบบ

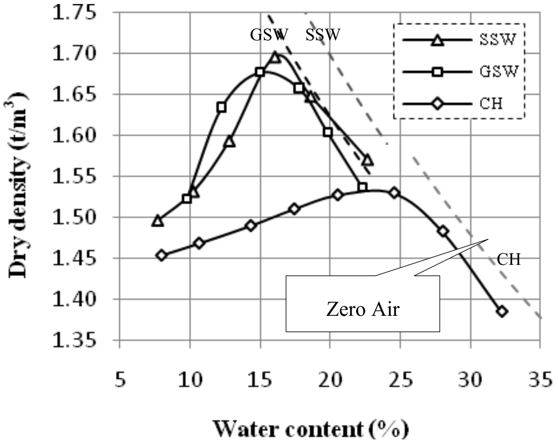
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติทางกายภาพ	GSW	SSW	CH
พิกัดเหลว (%)	42.5	NP	65.0
ดัชนีพลาสติก (%)	20.4		38.1
ความถ่วงจำเพาะ	2.40	2.57	2.66
เปอร์เซ็นต์ผ่าน #200 (%)	15.85	2.50	
USCS Classification	SC	SP	CH
AASHTO Classification	A-2-7	A-3	A-7-6

หมายเหตุ : NP = Non – Plastic

3.1.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม

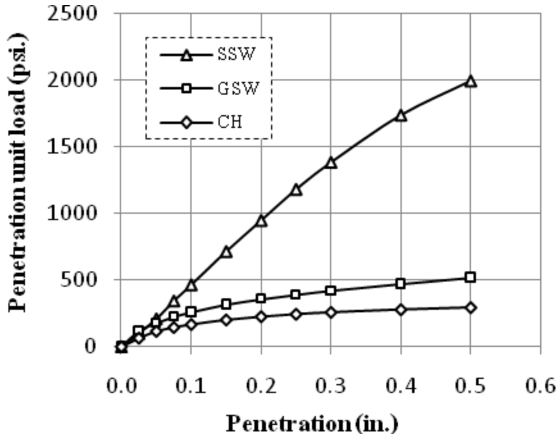
ผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน พบว่าดินเหนียว CH ได้ค่า OMC ที่ 23 % และมีค่า $\rho_{d(max)}$ เท่ากับ 1.53 t/m^3 ส่วนทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มมีค่า OMC และค่า $\rho_{d(max)}$ ที่ใกล้เคียงกัน โดยกลุ่ม SSW มีค่า OMC ที่ 16.5 % และมีค่า $\rho_{d(max)}$ เท่ากับ 1.70 t/m^3 ส่วนกลุ่ม GSW มีค่า OMC ที่ 15.3 % และมีค่า $\rho_{d(max)}$ น้อยกว่าเล็กน้อยคือ 1.68 t/m^3 ดังแสดงในรูปที่ 3



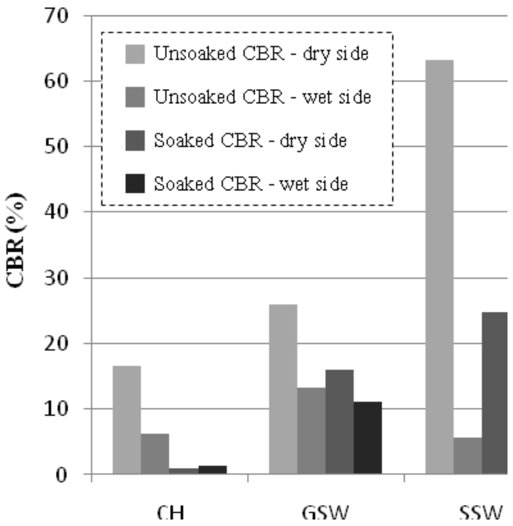
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความ หนาแน่นแห้งของดินเหนียวและทรายหล่อแบบ

จากรูปที่ 3 พบว่าเส้นโค้งการบดอัด (Compaction Curve) ของดินเหนียวและทรายหล่อแบบมีความแตกต่างกันโดยเส้นโค้งการบดอัดของดินเหนียวมีลักษณะกว้างและความชันของเส้นโค้งทางด้านแห้งต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความชันของเส้นโค้งทางด้านเปียก ซึ่งตรงข้ามกับทรายหล่อแบบที่เส้นโค้งการบดอัดมีลักษณะแคบและความชันของเส้นโค้งทั้งด้านแห้งและด้านเปียกสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า ρ_d ของทรายหล่อแบบจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดแปรเปลี่ยนโดยเฉพาะทรายหล่อแบบกลุ่ม SSW

ส่วนผลการทดสอบ CBR พบว่าดินเหนียวมีค่า CBR แบบไม่แช่น้ำทั้งด้านแห้งและด้านเปียกเท่ากับ 16.52 % และ 6.24 % ส่วนแบบแช่น้ำพบว่ามีค่า CBR เพียง 1% และมีการบวมตัวสูง โดยมีการบวมตัวที่ 4 วัน ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกเท่ากับ 6.97 % และ 4.43 % ส่วนทรายหล่อแบบกลุ่ม GSW มีค่า CBR สูงทั้งด้านแห้งและด้านเปียกโดยมีค่า CBR แบบไม่แช่น้ำทางด้านแห้งและด้านเปียกเท่ากับ 25.97 % และ 13.32 % ส่วนแบบแช่น้ำมีค่าเท่ากับ 16.02 % และ 11.13 % สำหรับกลุ่ม SSW พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดกับระยะจมมีความชันสูงมากเมื่อเทียบกับดินเหนียวและทรายหล่อแบบกลุ่ม GSW ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทำให้ค่า CBR แบบไม่แช่น้ำทางด้านแห้งมีค่าสูงถึง 63.2% แต่จะมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดเพิ่มขึ้น โดยที่ด้านเปียกมีค่า CBR เพียง 5.62 % เท่านั้น ส่วนแบบแช่น้ำมีค่า CBR ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกเท่ากับ 24.84 % และ 4.72 % โดยค่า CBR แบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกของดินเหนียวและทรายหล่อแบบแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดกับระยะจมของดินเหนียวและทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มแบบไม่แช่น้ำทางด้านแห้ง



รูปที่ 5 ค่า CBR ของดินแต่ละชนิด

ในส่วนผลของการบวมตัวนั้นพบว่า ทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มมีการบวมตัวต่ำ โดยกลุ่ม GSW มีค่าการบวมตัวที่ 4 วันทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกอยู่ที่ 1.53 %และ 0.73 % ส่วนกลุ่ม SSW มีการบวมตัวทางด้านแห้งเท่ากับ 0.58 % ส่วนทางด้านเปียกพบว่าไม่มีการบวมตัวโดยสามารถสรุปผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ใช้ทั้งดินเหนียว และทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่ม ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุที่ใช้

คุณสมบัติ		**ชนิดของดิน**		
		CH	**GSW**	**SSW**
OMC (%)		**23.0**	**15.3**	**16.5**
$\rho_{d(max)}$ (t/m^3)		**1.53**	**1.68**	**1.70**
Unsoaked CBR (%)	**dry side**	**16.52**	**25.97**	**63.17***
	wet side	**6.24**	**13.32**	**5.62***
Soaked CBR (%)	**dry side**	**0.98**	**16.02**	**24.84***
	wet side	**1.35**	**11.13**	**4.72***
Swelling (%)	**dry side**	**6.97**	**1.53**	**0.58**
	wet side	**4.43**	**0.73**	**0.00**
Water absorbed (%)	**dry side**	**6.70**	**3.74**	**3.79**
	wet side	**4.80**	**2.06**	**1.33**

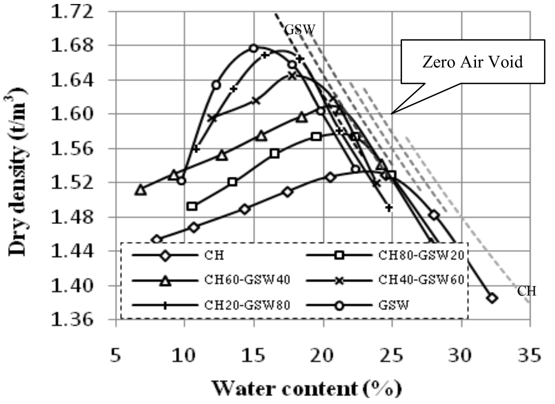
หมายเหตุ: * ค่า CBR ที่ 0.2 นิ้ว

3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่ผสมทรายหล่อแบบ

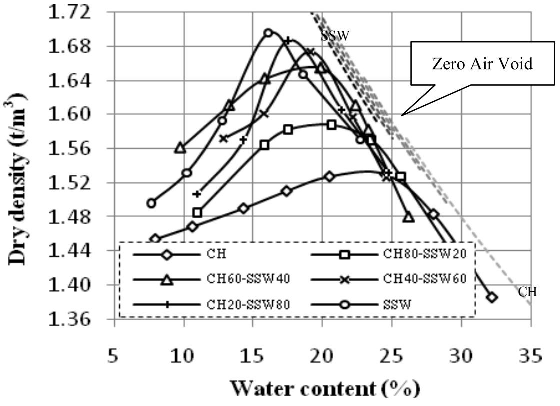
3.2.1 ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\rho_{d(max)}$)

เมื่อนำดินเหนียวมาผสมกับทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มพบว่าค่า OMC ลดลงและค่า $\rho_{d(max)}$ สูงขึ้นตามสัดส่วนของทรายหล่อแบบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถทำการบดอัดได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับ Mgangira (2006) [5] ที่ศึกษาปริมาณของทรายหล่อแบบที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทาง

วิศวกรรมของดินเหนียวโดยพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณทรายหล่อแบบจะส่งผลให้ค่า $\rho_{d(max)}$ เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของทรายหล่อแบบที่เพิ่มขึ้น



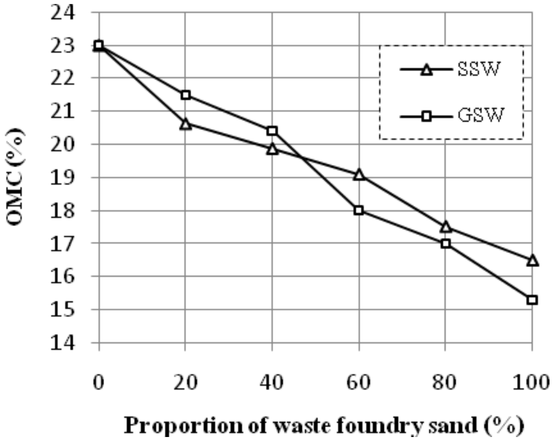
(ก) กลุ่ม GSW



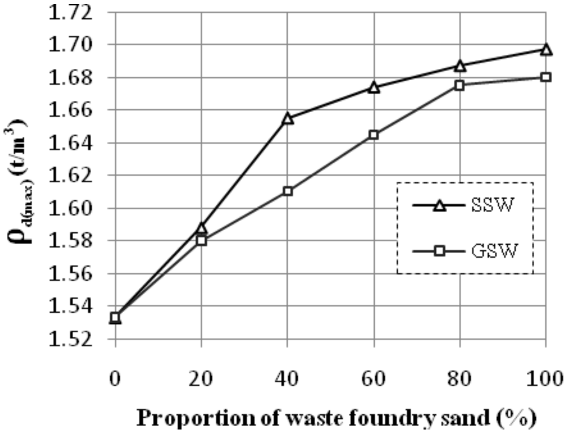
(ข) กลุ่ม SSW

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของดินเหนียวผสมทรายหล่อแบบ

จากรูปที่ 6 ผลจากการเพิ่มปริมาณทรายหล่อแบบทำให้เส้นโค้งการบดอัด (Compaction Curve) ของดินเหนียวมีความชันสูงขึ้นตามเส้นโค้งการบดอัดของทรายหล่อแบบ และขยับไปทางซ้ายและเลื่อนสูงขึ้นซึ่งส่งผลทำให้ค่า $\rho_{d(max)}$ เพิ่มขึ้น และค่า OMC ลดลงตามสัดส่วนของทรายหล่อแบบที่เพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 5 รูปที่ 7 แสดงผลของปริมาณทรายหล่อแบบที่ส่งผลต่อค่า OMC และ $\rho_{d(max)}$ ของดินเหนียวผสมทรายหล่อแบบ พบว่าสำหรับดินเหนียวเมื่อผสมกับทรายกลุ่ม GSW ค่า $\rho_{d(max)}$ จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อแทนที่ทราย 80% ขึ้นไป ในขณะที่กรณีของกลุ่ม SSW ค่า $\rho_{d(max)}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อแทนที่ทราย 40% ขึ้นไป



(ก) ค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC)



(ข) ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\rho_{d(max)}$)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนทรายหล่อแบบกับค่า OMC และ $\rho_{d(max)}$

ตารางที่ 5 ค่า $\rho_{d(max)}$ และค่า OMC ของดินเหนียวผสมทรายหล่อแบบ

ชนิดของดิน	OMC (%)	$\rho_{d(max)}$ (t/m^3)
CH	23.0	1.533
CH80-GSW20	21.5	1.580
CH60-GSW40	20.4	1.610
CH40-GSW60	18.0	1.645
CH20-GSW80	17.0	1.675
GSW	15.3	1.680
CH80-SSW20	20.6	1.588
CH60-SSW40	19.9	1.655
CH40-SSW60	19.1	1.674
CH20-SSW80	17.5	1.687
SSW	16.5	1.697

3.2.2 California Bearing Ratio (CBR)

- **ค่า CBR แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked CBR)**

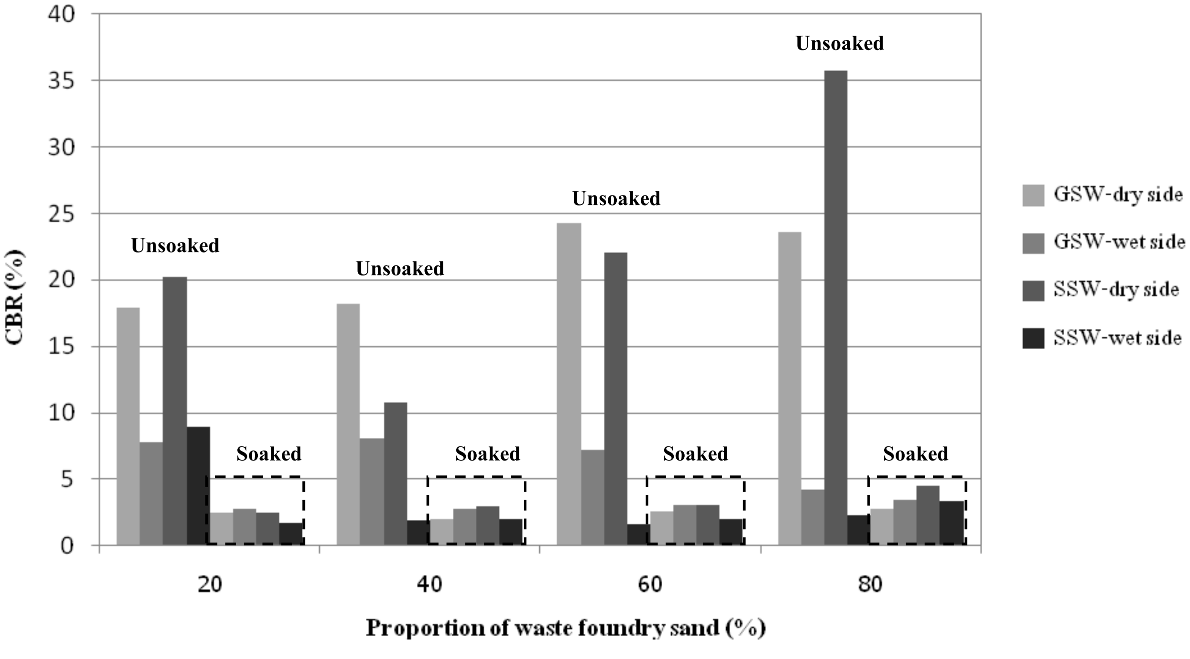
ผลจากการเพิ่มปริมาณทรายกลุ่ม GSW พบว่าค่า CBR เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อแทนที่ทรายหล่อแบบ 40 % เมื่อเทียบกับดินเหนียวที่ยังไม่ได้ผสม ค่า CBR ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกเพิ่มขึ้นประมาณ 2 % เท่านั้นทั้งนี้เนื่องจากทรายกลุ่ม GSW ผ่านการใช้งานจากการทำแบบหล่อภาย นอก ซึ่งใช้เบนโทไนท์เป็นส่วนผสม ดังนั้นเมื่อนำไปผสมกับดินเหนียว ค่า CBR จึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 6 ส่วนผลการเพิ่มปริมาณทรายกลุ่ม SSW พบว่าที่สัดส่วนทรายหล่อแบบ 20 % เมื่อเทียบกับค่า CBR ของดินเหนียวที่ยังไม่ได้ผสม ค่า CBR ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกเพิ่มขึ้นประมาณ 3 % และมีค่าลดลงที่ทรายหล่อแบบ 40 % ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อแทนที่ทรายหล่อแบบ 40 % ขึ้นไปคุณสมบัติของดินเหนียวที่ผสมกับทรายกลุ่ม SSW เริ่มมีคุณสมบัติคล้ายกับตัวทรายหล่อแบบเองดังจะเห็นได้จากเส้นโค้งการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ซึ่งค่าปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่า ρ_d และมีผลให้คุณสมบัติการรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) ลดลงด้วย [6]

- **ค่า CBR แบบแช่น้ำ (Soaked CBR)**

จากการศึกษาพบว่าในส่วนของค่า CBR แบบแช่น้ำทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียก ผลจากการเพิ่มปริมาณทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่ม ส่งผลให้ค่า CBR ของดินเหนียวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่สัดส่วน 80 % ค่า CBR ของดินเหนียวที่ผสมกับทรายกลุ่ม GSW ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกมีค่าเท่ากับ 2.8 % และ 3.47 % ส่วนที่ผสมกับทรายกลุ่ม SSW มีค่า CBR ทางด้านแห้งและด้านเปียกเท่ากับ 4.54 % และ 3.37 % โดยพบว่าค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงประมาณ 2-3 % เท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ทรายหล่อแบบจะมีกำลังลดลงอย่างมากที่ปริมาณความชื้นสูง[6-8]โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR แบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำ ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกกับสัดส่วนของทรายหล่อแบบ แสดงดังรูปที่ 8

ตารางที่ 6 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแต่ละสัดส่วนที่ใช้

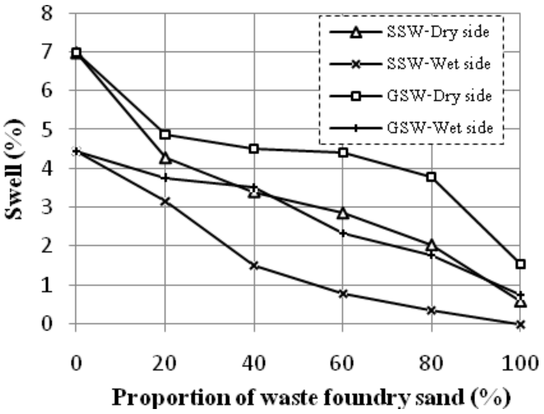
คุณสมบัติ		สัดส่วนที่ใช้							
		CH80-GSW20	**CH60-GSW40**	**CH40-GSW60**	**CH20-GSW80**	**CH80-SSW20**	**CH60-SSW40**	**CH40-SSW60**	**CH20-SSW80**
OMC (%)		21.5	20.4	18.0	17.0	20.6	19.9	19.1	17.5
$\rho_{d(max)}$ (t/m^3)		1.580	1.610	1.645	1.675	1.588	1.655	1.674	1.687
Unsoaked CBR (%)	dry side	17.87	18.21	24.28	23.61	20.23	10.79	22.03	35.75
	wet side	7.76	8.09	7.25	4.22	8.94	1.87	1.57	2.25
Soaked CBR (%)	dry side	2.47	2.02	2.57	2.80	2.47	2.92	3.04	4.54
	wet side	2.77	2.73	3.10	3.47	1.75	2.02	2.02	3.37
Swelling (%)	dry side	4.87	4.51	4.41	3.78	4.27	3.4	2.85	2.03
	wet side	3.76	3.50	2.34	1.78	3.15	1.51	0.77	0.34
Water absorbed (%)	dry side	5.64	4.97	4.55	4.06	5.14	4.80	4.52	4.18
	wet side	3.48	3.2	2.98	2.76	4.14	2.76	1.14	1.03



รูปที่ 8 สัดส่วนของทรายหล่อแบบที่ส่งผลต่อค่า CBR

3.2.3 การบวมตัว

ในส่วนของการบวมตัวจากการใช้แผ่นน้ำหนักถ่วงทับขนาด 10 ปอนด์นั้น จากการทดสอบพบว่าผลจากการเพิ่มปริมาณทรายหล่อแบบ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของดินเหนียวมีค่าลดลงตามสัดส่วนของทรายหล่อแบบที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบวมตัวกับสัดส่วนของทรายหล่อแบบ

โดยพบว่าในทางด้านแห้งมีการบวมตัวมากกว่าทางด้านเปียก และพบว่าการบวมตัวของดินเหนียวที่ผสมกับทรายหล่อแบบกลุ่ม GSW จะมีค่าการบวมตัวมากกว่าที่ผสมกับทรายหล่อแบบกลุ่ม SSW ทั้งนี้เนื่องจากทรายกลุ่ม GSW มีเบนโทไนท์เป็นส่วนผสม ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติการบวมตัวสูงอยู่แล้วเมื่อสัมผัสกับน้ำ ดังนั้นจึงมีค่าการบวมตัวที่มากกว่ากลุ่ม SSW โดยสามารถสรุปผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวที่ผสมกับทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มในสัดส่วนต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 6

4. สรุปผลของการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลของการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดของทรายหล่อแบบและดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมกับทรายหล่อแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ทรายหล่อแบบทั้งสองกลุ่มมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้งานตามมาตรฐานของกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบท เพื่อใช้เป็นวัสดุถมคันทางได้ และเนื่องจากทรายหล่อแบบกลุ่ม SSW จัดเป็นวัสดุประเภท Non – Plastic ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นทรายถมคันทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงได้อีกด้วย
- ในส่วนของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมกับทรายหล่อแบบนั้นพบว่ามีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานทาง เนื่องจากผลจากการเพิ่มปริมาณทรายหล่อแบบส่งผลให้ค่า CBR แบบแช่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทเพื่อใช้เป็นวัสดุถมคันทาง อย่างไรก็ดีควรมีการศึกษาคุณสมบัติอื่น เช่น คุณสมบัติด้านความซึมน้ำเพื่อใช้ประโยชน์ในการเป็นชั้นกันซึม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัดที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ศูนย์แลกเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้,และสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, *แนวทางการใช้ประโยชน์*

จากทรายหล่อแบบ, โรงพิมพ์บางจากการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2545

[2] กรมทางหลวง, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ มาตรฐานที่ ทล.-ม. 102/2532, *มาตรฐานถมคันทาง*

[3] กรมทางหลวงชนบท, มาตรฐานที่ มทช. 201-2545, *มาตรฐานวัสดุถมคันทาง.*

[4] กรมทางหลวง, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ , มาตรฐานที่ ทล.-ม. 103/2532, *มาตรฐานทรายถมคันทาง.*

[5] Mgangira, Laboratory Assessment of the Influence of the Proportion of Waste Foundry Sand on the Geotechnical Engineering Properties of Clayey Soils, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering,* Vol. 48(1), pp. 2-7, 2006.

[6] FIRST, Foundry Sand Facts for Civil Engineers, *Federal Highway Administration Report,* FHWA-IF-04-004, from http://www: foundryrecycling.org*, 2004.*

[7] Guney, Aydilek, & Demirkan, Geoenvironmental Behavior of Foundry Sand Amended Mixtures for Highway Subbases, *Waste Management,* Vol. 26, pp. 932-945, 2005.

[8] Kleven, Edil, & Benson, *Mechanical Properties of Excess Foundry System Sand for Roadway Subgrade,* from http://www: foundryrecycling.org, 1998.