บทที่ 2

การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษาและสิ่งที่ได้รับจากการศึกษาในอดีต

2.1.1 การศึกษาในอดีตที่เกี่ยวข้อง

ผลงานการศึกษาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาที่ได้รวบรวมมานี้ มีการเปรียบเทียบวิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งโดยวิธีมาร์แชลและโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 ทั้งการออกแบบในห้องทดลองและการนำไปใช้งานจริงในสนาม ดังมีรายละเอียดดังนี้

Livneh (1990) ได้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมต่อการใช้งานในเขตพื้นที่ที่มีอากาศร้อน และได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกาและหลายประเทศในทวีปยุโรป โดยกล่าวว่าวิธีดังกล่าวนี้ยังมีข้อบกพร่องอยู่หลายประการคือ

- วิธีมาร์แชลเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นมาจากประสบการณ์ ไม่ได้คำนึงถึงพื้นที่ที่นำไปใช้งานหรือไม่ได้คำนึงถึงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาพการใช้งานจริง
- การศึกษาหลายการศึกษาพบว่า ค่าเสถียรภาพของมาร์แชล(Marshall stability) ค่าการไหล(Marshall flow) หรือแม้แต่ค่าสัดส่วนของค่าเสถียรภาพของมาร์แชลต่อค่าการไหล ค่าต่างๆเหล่านี้ล้วนไม่มีความสัมพันธ์ที่เด่นชัดต่อการเกิดร่องล้อ(rutting)
- วิธีมาร์แชลนั้นไม่ได้สื่อถึงการเกิดความล้า(Fatigue)ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเลย

จากข้อบกพร่องต่างๆของวิธีมาร์แชล จึงได้มีการศึกษาหาวิธีการออกแบบวิธีใหม่ ที่สามารถสื่อถึงความสามารถในการใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เด่นชัดขึ้น โดยความสามารถต่างๆก็คือความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อ การเกิดความล้าและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของ

อุณหภูมิและความชื้น ซึ่งวิธีที่กล่าวถึงนี้จะมีชื่อว่าวิธีเฟรนช์ (French Method) โดยจะมีการทดสอบหลักๆดังนี้

- Gyratory shear compactor test เพื่อใช้ในการเลือกส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- Wheel tracking rutting test ใช้ในการทดสอบหาความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อ
- Direct tensile load test ใช้ในการทดสอบหาความล้าที่วัสดุสามารถต้านทานได้
- Unconfined compression test (with and without immersion) สำหรับทดสอบความคงทนเมื่อต้องเผชิญกับสภาพอุณหภูมิและความชื้นที่มีการเปลี่ยนแปลง

Roberts et al. (1996) ได้กล่าวถึงการบดอัดที่ทำในห้องทดลอง ซึ่งก็เพื่อจำลองความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อรองรับปริมาณจราจรได้จนถึงปริมาณที่ต้องการ แต่ทั้งวิธีมาร์แชลและ ฮวีม (Hveem) ไม่สามารถที่จะจำลองความหนาแน่นของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อก่อสร้างเสร็จใหม่ๆ หรือในสภาพการใช้งานจริงที่ปริมาณการจราจรมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ประมาณไว้ได้ หากปริมาณการจราจรมีมากหรือน้อยกว่าที่ประมาณไว้ก็จะส่งผลให้ปริมาณช่องว่างของอากาศ(air void) มีค่าที่น้อยกว่าหรือมากกว่าที่ประมาณไว้ในห้องทดลองได้ ปริมาณช่องว่างของอากาศที่น้อยกว่าหรือมากกว่านี้จะไม่สามารถทราบได้เลยว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่ ในขณะที่การบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory compactor จะสามารถประมาณปริมาณช่องว่างของอากาศที่มีอยู่หรือสามารถจำลองความหนาแน่นที่เกิดขึ้นตั้งแต่ก่อสร้างเสร็จจนถึงเมื่อรองรับปริมาณการจราจรตามที่ต้องการหรือมากกว่าได้ เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวสามารถบดอัดจนได้ปริมาณช่องว่างของอากาศที่น้อยกว่าวิธีมาร์แชลได้ ดังนั้นหากถนนจริงต้องรับปริมาณการจราจรที่น้อยกว่าหรือมากกว่าที่ประมาณไว้ ก็จะสามารถทราบปริมาณช่องว่างของอากาศได้ว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่

Sousa et al. (1995) ได้กล่าวว่า การทดสอบค่าเสถียรภาพในวิธีการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชลนั้น จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ 60°C (140°F) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวร(Permanent deformation) จากวิธีนี้จะเห็นว่าถ้ามีการเปลี่ยนประเภทของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในการทดสอบก็จะทำให้ได้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมแตกต่างกันไปเพราะค่าความหนืด(viscosity)ของแอสฟัลต์ซีเมนต์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 60°C นั้นย่อมมีค่าต่างกัน แต่ในวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 ประเภทของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้จะไม่ส่งผลต่อข้อมูลจากการบดอัดเพราะในการบดอัดนั้นจะทำที่อุณหภูมิที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีค่าความหนืดเท่าๆกัน ดังนั้นปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เลือกมาได้จะไม่เกี่ยวข้องกับประเภทของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ และในวิธี

ซูเปอร์เพฟนี้ในขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมจะมีการคำนึงถึงอุณหภูมิของบริเวณที่จะใช้งานเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากปริมาณการจราจรที่ต้องคำนึงถึงในทั้ง 2 วิธีอยู่แล้ว

Hafez และ Witczak (1995) ทำการศึกษาภายใต้หัวข้อเรื่อง "Comparison of Marshall and Superpave Level I Mix Design for Asphalt Mixes" ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบส่วนผสมที่ได้จากการใช้วิธีมาร์แชลที่จำนวนการบดอัดเท่ากับ 75 ครั้ง และวิธีจากซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 มีส่วนผสมทั้งหมด 20 ส่วนผสม สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มด้วยกันคือ 1) conventional mixtures 2) wet process asphalt rubber(manufacturer preblended) 3) dry process rubber asphalt 4) polymer modified และ 5) wet process asphalt rubber(plant blended) ซึ่งมวลรวมที่ใช้จะมีลักษณะต่างๆเหมือนกัน ยกเว้นเพียงส่วนผสมเดียวที่แตกต่างกันไป

การศึกษาจะทำการหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละส่วนผสมเพื่อเปรียบเทียบกัน ในวิธีมาร์แชลจะหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปริมาณช่องว่างของอากาศเท่ากับร้อยละ 3 ร้อยละ 4 และร้อยละ 5 ตามลำดับ ส่วนในวิธีซูเปอร์เพฟ ก็จะทำในลักษณะเดียวกันแต่ที่แต่ละค่าปริมาณช่องว่างของอากาศนั้น จะทำการแบ่งการหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ออกเป็นตามช่วงของอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยของอากาศที่จะนำไปใช้ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวคือ 34°C 37-38°C และ 43-44°C ในการเปรียบเทียบกันนี้จะแสดงในรูปของผลต่างของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากทั้ง 2 วิธี(ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์จากวิธีซูเปอร์เพฟลบด้วยปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์จากวิธีมาร์แชล) นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีเปรียบเทียบจำนวนการบดอัดเทียบเท่า ซึ่งก็คือค่าจำนวนการบดอัดโดยวิธีซูเปอร์เพฟที่ทำให้ได้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์มีค่าเท่ากับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากวิธีมาร์แชล

ผลที่ได้จากการศึกษาสรุปได้ว่า

1. วิธีการบดอัดของซูเปอร์เพฟไม่สามารถใช้ได้กับส่วนผสมกลุ่มที่ 3(dry process rubber asphalt) เพราะวัสดุค่อนข้างมีความยืดหยุ่น ทำให้เกิดการคืนตัวภายหลังจากการบดอัด
2. สำหรับส่วนผสมอื่นๆ พบว่าการใช้วิธีซูเปอร์เพฟนั้นให้ผลที่ดีกว่า
3. จากการเปรียบเทียบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้รับจากทั้ง 2 วิธี พบว่า
   3.1 ในแต่ละส่วนผสมใดๆ ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่แตกต่างกันของทั้ง 2 วิธีไม่ได้ขึ้นกับปริมาณช่องว่างของอากาศ นั่นคือแนวโน้มของความแตกต่างของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณช่องว่างของอากาศ

3.2 ในขณะที่ช่วงที่อุณหภูมิที่ใช้เปลี่ยนจากช่วงอุณหภูมิที่สูงไปช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า พบว่าผลต่างของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น(ค่าผลต่างจะต่างกันประมาณร้อยละ 1) นั่นคือค่าความแตกต่างของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่จะนำไปใช้งานมีค่าต่ำลง

สำหรับค่าจำนวนการบดอัดเทียบเท่าจากวิธีมาร์แชลนั้นพบว่า สำหรับกลุ่ม 1 และกลุ่ม 2 นั้น ค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากค่าการบดอัดที่จำนวนรอบที่ต้องการ (N_{des}) ในช่วงอุณหภูมิที่อบอุ่นมาก (43-44°C) ส่วนกลุ่มที่เหลือ(กลุ่ม 4 และ 5)จะได้ค่าการบดอัดเทียบเท่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 34°C และ 37-38°C

Habib et al. (1998) ภายใต้การศึกษาชื่อ "Comparison of Superpave and Marshall Mixtures for Low-Volume Roads and Shoulder" เป็นการศึกษาการนำการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพฟมาใช้ในการก่อสร้างถนนที่ใช้รองรับปริมาณการจราจรที่ต่ำหรือในบริเวณไหล่ทาง โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ได้จากวิธีมาร์แชล การศึกษาได้ทดลองทำที่ถนนสาย Kansas Route 177 ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของ Kansas ใช้มวลรวมที่มีอยู่ในท้องถิ่นประกอบด้วยหินปูน ทรายแม่น้ำแบบละเอียด และทรายแม่น้ำแบบหยาบ ผสมเป็นมวลรวมที่มีขนาดคละแตกต่างกัน 5 ส่วนผสม โดยแต่ละส่วนผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนทรายละเอียดและจำนวนทรายหยาบ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้จะเป็น AC-10(PG58-22)

คุณสมบัติที่ทำการศึกษา สำหรับวิธีซูเปอร์เพฟจะเป็นคุณสมบัติต่างๆทางด้านปริมาตร ประกอบด้วยปริมาณช่องว่างของอากาศ ปริมาณช่องว่างในมวลรวม(VMA) ปริมาณช่องว่างที่ถูกเติมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์(VFA) ค่าร้อยละความหนาแน่นสูงสุด($\%G_{mm}$)ที่จำนวนการบดอัดเริ่มต้น (N_{ini})และที่จำนวนการบดอัดสูงสุด(N_{max}) และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้ ส่วนคุณสมบัติที่ทำการศึกษาสำหรับวิธีมาร์แชล ก็จะมีการหาคุณสมบัติทางด้านปริมาตรเช่นเดียวกัน แต่ก็จะหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหลเพิ่มขึ้นด้วย จากนั้นจึงนำปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และค่าต่างๆที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

ผลของการเปรียบเทียบที่ปริมาณช่องว่างของอากาศเท่ากัน(ร้อยละ 4) พบว่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากวิธีซูเปอร์เพฟจะมีค่าต่ำกว่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากวิธีมาร์แชล พร้อมกันนี้ค่าปริมาณช่องว่างในมวลรวม และปริมาณช่องว่างที่ถูกเติมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์จากวิธีซูเปอร์เพฟ ก็จะมีค่าต่ำกว่าด้วย ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่าของซูเปอร์เพฟนี้เป็นข้อดีที่เหนือ

กว่ามาร์แชล เพราะจะใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดน้อยลงทำให้เกิดความประหยัดในการก่อสร้าง ส่วนผสมของซูเปอร์เพฟที่มีสัดส่วนปริมาณทรายหยาบที่ต่ำจะได้ค่าต่างๆตรงตามที่กำหนด (ยกเว้นค่าปริมาณช่องว่างที่ถูกเติมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ในกรณีที่ปริมาณการจราจรต่ำ) ส่วนสัดส่วนผสมจากวิธีมาร์แชลพบว่า ค่าเสถียรภาพที่ได้นั้นไม่ตรงตามข้อกำหนดของ Asphalt Institute สำหรับปริมาณการจราจรปานกลาง แต่บางส่วนผสมจะผ่านข้อกำหนดของ KDOT(Kansas Department of Transportation)สำหรับปริมาณการจราจรต่ำ

นอกจากนี้พบว่าปริมาณทรายหยาบที่ใช้ควรให้มีค่าต่ำที่สุดเพราะการใช้ทรายหยาบจะทำให้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่หามาได้นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้โครงสร้างของมวลรวมอ่อนแอลง ข้อกำหนดของค่าปริมาณช่องว่างที่ถูกเติมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับปริมาณการจราจรที่ต่ำนั้นก็จะดูเป็นค่าที่สูงเกินไป เพราะส่วนผสมที่ไม่ผ่านตามข้อกำหนดนี้จะสามารถคำนวณความหนาของแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ค่าที่มากแล้ว และสุดท้ายการใช้ค่าการบดอัดที่จำนวนรอบที่ต้องการ(N_{des})ที่ต่ำกว่าจะส่งผลให้ได้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มากขึ้นไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมใดๆก็ตาม

Sebaaly et al. (1997) ทำการศึกษาเปรียบเทียบส่วนผสมที่ได้จากวิธีการออกแบบโดยวิธีฮวีม(Hveem) โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมชนิดต่างๆ พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัว และการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) สามารถสื่อถึงการเกิดร่องล้อได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้การทดสอบแรงกระทำสามแกนโดยใช้น้ำหนักกระทำซ้ำ (triaxial repeated-load) นอกจากนี้ขนาดคละที่ผ่านเข้าไปในพื้นที่ถูกจำกัด (restricted zone) ก็ยังทำให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณภาพดีผ่านเกณฑ์การคัดเลือกที่กำหนดไว้ ในขณะที่ขนาดคละที่ผ่านเหนือพื้นที่ถูกจำกัดทำให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านตามเกณฑ์จำนวนน้อยที่สุด

Watson Johnson และ Jared (1997) ได้กล่าวถึงข้อกำหนดขนาดคละมวลรวมของ Georgia Department of Transportation (GDOT) ซึ่งจะอยู่ในพื้นที่ถูกจำกัดที่ซูเปอร์เพฟได้แนะนำว่าไม่ควรมี ดังนั้นทาง GDOT จึงได้ใช้วิธีการนำ Georgia loaded wheel tester เข้ามาใช้ เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพของส่วนผสมที่ได้ก่อนว่ามีคุณภาพใช้ได้หรือไม่ ผลที่ได้พบว่าถึงแม้ขนาดคละของมวลรวมจะเข้าไปในพื้นที่ถูกจำกัด แต่ส่วนผสมที่ได้ก็ยังมีคุณภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้ดีไม่ถูกคัดออกตั้งแต่ในกระบวนการตรวจสอบ

Kuennen (1998) กล่าวถึง "พื้นที่ถูกจำกัด(restricted zone)" หรือขนาดคละที่ซูเปอร์เพฟได้แนะนำไว้ว่าไม่ควรมีอยู่ในส่วนผสมที่ใช้ ซึ่งปริมาณของขนาดคละในบริเวณดังกล่าวจะเป็นการกำหนดปริมาณของมวลรวมละเอียดไม่ให้มีในปริมาณที่ส่งผลต่อการเกิดร่องล้อได้ง่าย ในช่วงเวลา 2 ปีของการทำงานในสนามและการศึกษาทบทวน ทางหน่วยงานของรัฐหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานถนนในระดับท้องถิ่นหลายหน่วยงานพบว่าส่วนผสมของซูเปอร์เพฟที่ไม่ได้ตรงตามคำแนะนำในส่วนของขนาดคละในบริเวณพื้นที่ถูกจำกัดหรือส่วนผสมที่มีขนาดคละอยู่ในพื้นที่ดังกล่าวก็ยังคงใช้งานได้ดีในสนาม และในบางกรณีการจำกัดปริมาณขนาดคละให้ตรงตามข้อกำหนดของพื้นที่ถูกจำกัดจะเป็นการยากต่อการทำให้ได้ตรงตามคุณสมบัติทางปริมาตรของซูเปอร์เพฟ นอกจากนี้การควบคุมให้ได้ขนาดคละตรงตามข้อกำหนดของพื้นที่ถูกจำกัดยังส่งผลถึงปัญหาในการผลิตมวลรวมอีกด้วย

Anderson Bosley และ Creamer (1995) กล่าวถึงการนำซูเปอร์เพฟไปใช้ในงานควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง ซึ่งจะเป็นการประเมินตั้งแต่การบดอัดด้วย Superpave Gyratory Compactor ในห้องปฏิบัติการและยังเปรียบเทียบกับวิธีมาร์แชล ผลที่ได้พบว่าอย่างน้อยที่สุด SGC เป็นเครื่องมือที่ใช้ควบคุมงานในสนามได้ดีพอกับเครื่องมือในวิธีของมาร์แชล แต่การบดอัดด้วย SGC นั้นจะช่วยให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันของแต่ละตัวอย่างลดน้อยลง หรือมีความแปรปรวนเกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างน้อยกว่า

Harman Angelo และ Bukowski (1995) ได้กล่าวถึงการนำ Superpave Gyratory Compactor ไปใช้ในการควบคุมคุณภาพงานในสนามเช่นเดียวกัน การใช้ SGC จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเมื่อนำไปใช้ในการออกแบบคุณสมบัติทางด้านปริมาตรและการควบคุมคุณภาพของงานในงานสนาม ขณะที่เครื่องมือบดอัดด้วยวิธีมาร์แชลไม่ได้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพนัก

ชยธันว์ (2542) ได้กล่าวเปรียบเทียบวิธีการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลกับการบดอัดก้อนตัวอย่างโดย Superpave Gyratory Compactor ในวิธีของซูเปอร์เพฟ ว่า การบดอัดก้อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลยังมีข้อบกพร่องและขีดจำกัดอยู่หลายประการคือ

- การบดอัดก้อนตัวอย่างโดยการกระแทกของก้อนน้ำหนักนั้นแตกต่างจากลักษณะการบดอัดผิวทางในสนามโดยรถบดอย่างสิ้นเชิง ส่งผลให้การออกแบบคลาดเคลื่อนได้
- ความสม่ำเสมอในการบดอัดค่อนข้างต่ำเนื่องจากใช้แรงงานคน จึงมีความคลาดเคลื่อนสูง

- มีขีดจำกัดในขนาดของแบบหล่อทำให้ไม่สามารถออกแบบส่วนผสมโดยใช้วัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ได้
- มีความแปรปรวนของผลการบดอัดค่อนข้างสูง

สำหรับวิธีซูเปอร์เพฟได้นำเครื่องมือ Superpave Gyratory Compactor มาใช้ในการบดอัดก้อนตัวอย่าง ซึ่งมีมุมเอียงในการบดอัดเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ และสามารถทราบข้อมูลความสูงของก้อนตัวอย่างระหว่างการบดอัดเพื่อใช้ในการออกแบบและควบคุมคุณภาพของส่วนผสม โดยที่จะมีข้อกำหนดเรื่องความหนาแน่นที่จำนวนรอบต่างๆซึ่งก้อนตัวอย่างจะต้องมีค่าความหนาแน่นไม่เกินหรืออยู่ในช่วงที่กำหนด ในส่วนนี้ก็จะทำให้ได้ส่วนผสมที่สามารถบดอัดได้อย่างมีคุณภาพ

ชยธันว์ (2541) กล่าวถึงความเป็นมาของวิธีทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) และข้อดีของวิธีดังกล่าวคือ

- วิธีการทดสอบมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- การพังทลายของวัสดุเนื่องจากการทดสอบไม่มีผลจากสภาพของผิวของวัสดุทดสอบทำให้แน่ใจว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง
- การพังทลายของวัสดุเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่สามารถหาได้จากวิธีทดสอบนี้ สามารถแบ่งได้เป็น

- การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักแบบคงที่ (Static Indirect Tensile Test)
  - ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Static Modulus of Elasticity)
  - ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)
  - ค่าสัดส่วนปัวซอง (Static Poisson's ratio)

- การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ
  (Repeated-Load Indirect Tensile Test)
  - ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus of Elasticity)
  - ค่าสัดส่วนปัวซองแบบคืนตัว (Resilient Poisson's ratio)

- ค่าความล้า (Fatigue characteristics)
- ค่าการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent deformation characteristics)

2.1.2 สิ่งที่ได้รับจากการศึกษาในอดีต

จากการศึกษาผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่นำมาแสดงข้างต้น สามารถสรุปสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อแนวทางการทำวิจัยได้ดังนี้

- วิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอดีตและปัจจุบันในประเทศไทยยังคงใช้อยู่ เป็นวิธีการที่ยังมีข้อบกพร่องและข้อจำกัดอยู่หลายประการ จึงควรพิจารณาถึงวิธีการใหม่ๆที่สามารถลดข้อบกพร่องต่างๆ มาใช้ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟเป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้ได้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณภาพดีขึ้น และในปัจจุบันก็เป็นที่ยอมรับและทดลองใช้กันโดยทั่วไป ในวิธีการออกแบบได้ใช้เครื่องมือในการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยพยายามเลียนแบบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม และสามารถทราบคุณลักษณะของส่วนผสมได้ตลอดการบดอัดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณา
- การบดอัดในห้องทดลองจะใช้เครื่องมือชื่อว่า Superpave Gyratory Compactor ซึ่งจะมีลักษณะการบดอัดชิ้นตัวอย่างพยายามให้คล้ายกับการบดอัดที่เกิดขึ้นจริงในการก่อสร้างหรือใช้งานในสนาม เครื่องมือนี้จะช่วยให้ทราบรายละเอียดของคุณสมบัติทางปริมาตรมากกว่าที่ได้รับจากวิธีมาร์แชล ทำให้สามารถประมาณสิ่งที่เกิดขึ้นจริงกับแอสฟัลต์คอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อสร้างจนถึงเมื่อใช้งานอย่างหนักหรือรองรับปริมาณจราจรที่เกินจากที่ประมาณไว้ได้
- มีการศึกษาหลายการศึกษาที่มุ่งเปรียบเทียบวิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตระหว่างวิธีมาร์แชลกับวิธีของซูเปอร์เพฟ เพื่อศึกษาถึงลักษณะของส่วนผสมที่ได้เมื่อใช้วิธีการออกแบบที่แตกต่างกัน
- ยังไม่มีรายงานที่ชัดเจนว่าขนาดคละของมวลรวมที่ผ่านเข้าไปในพื้นที่ถูกจำกัดซึ่งเป็นคำแนะนำของซูเปอร์เพฟจะทำให้ได้มาซึ่งส่วนผสมที่มีคุณภาพที่ไม่ดี
- การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัวและความล้าซึ่งใช้เป็นค่าในการเปรียบเทียบส่วนผสมที่ได้นั้น สามารถใช้วิธีการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบน้ำหนักกระทำซ้ำได้ ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก เป็นที่ยอมรับใช้โดยทั่วไปและให้ค่าที่น่าเชื่อถือ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำวิจัยที่จะนำมาแสดงไว้ในเนื้อหาส่วนนี้ก็คือวิธีการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชล และวิธีซูเปอร์เพฟ โดยที่วิธีซูเปอร์เพฟนั้นจะพิจารณาเฉพาะระดับ 1 เท่านั้น

2.2.1 การออกแบบส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชล

เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นที่ Mississippi Highway Department โดยบรูซ มาร์แชล วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยทั่วไปในหลายๆประเทศ หากพิจารณาจากข้อมูลในอดีต การสำรวจในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1984 จะมีผู้ใช้วิธีมาร์แชลอยู่ถึง 38 รัฐ ในขณะที่ 10 รัฐจะใช้วิธีฮวีม และที่เหลือจะเป็นวิธีอื่นๆ การทดสอบโดยวิธีมาร์แชลนี้จะปรากฏรายละเอียดของวิธีการทดสอบอยู่ในมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ASTM D1559 และ AASHTO T245

วิธีการหาสัดส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลนี้เป็นการหาปริมาณยางที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้มีลักษณะตรงตามข้อกำหนดหรือหลักเกณฑ์ที่ตั้งไว้ วิธีการที่ใช้ในห้องทดลองจะทำการผสมส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วบดอัดโดยใช้การปล่อยก้อนน้ำหนักลงกระแทกก้อนตัวอย่างด้วยจำนวนการบดอัดที่แน่นอนซึ่งกำหนดตามลักษณะของปริมาณการจราจรที่ต้องรองรับ เพราะที่แต่ละค่าจำนวนการบดอัดก็จะเปรียบเสมือนเป็นการจำลองการบดอัดที่เกิดจากการจราจรจริง เช่นถ้าปริมาณการจราจรมากจำนวนการบดอัดก็จะมีค่ามากด้วย จากก้อนตัวอย่างที่ได้ภายหลังจากการบดอัดจะนำมาทำการหาคุณสมบัติทางด้านปริมาตร คือ ปริมาณช่องว่างในมวลรวม(VMA) ปริมาณช่องว่างที่ถูกเติมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์(VFA) และปริมาณช่องว่างของอากาศ(air void) และยังทำการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ(stability) และการไหล (flow)

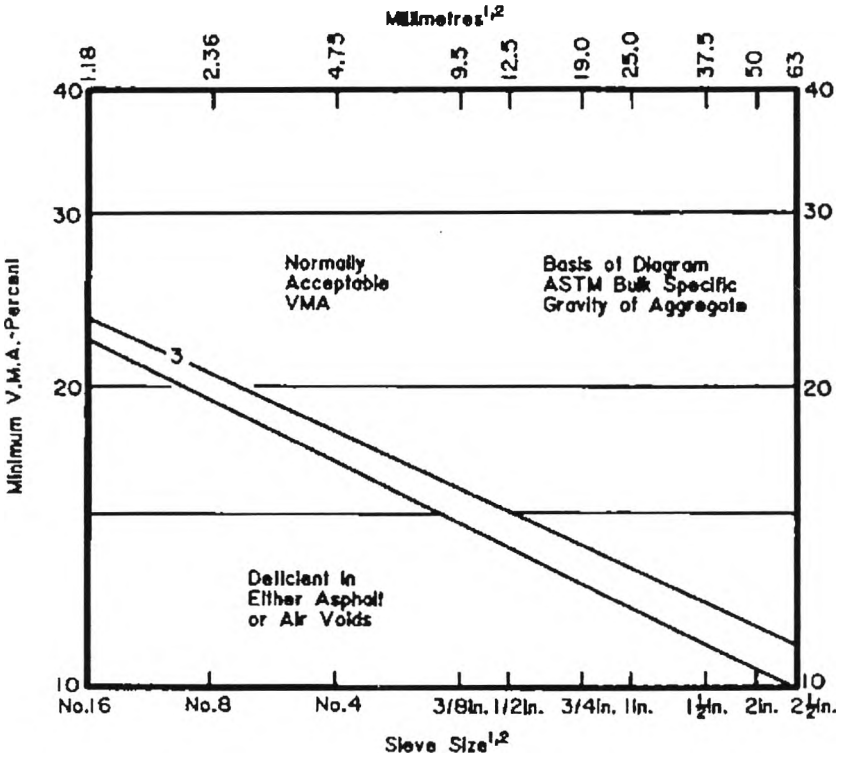
ในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทดลองใช้ หาคุณสมบัติทางด้านปริมาตรของส่วนผสมที่แต่ละค่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ แล้วทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ จะสามารถเลือกปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมตามข้อกำหนดได้ ข้อกำหนดของวิธีมาร์แชลซึ่งจะแสดงถึงค่าคุณสมบัติต่างๆที่ต้องการที่แต่ละค่าจำนวนการบดอัดจะแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 ส่วนรูปที่ 2.2 จะแสดงตัวอย่างของการนำข้อมูลมาเขียนกราฟเพื่อประเมินหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.1 หลักเกณฑ์การออกแบบโดยวิธีมาร์แชล

Marshall Method Mix Criteria	Traffic					
	Light		Medium		Heavy	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Compaction No. of blows/side	35		50		75	
Stability , lb (N)	750 (3333)	-	1200 (5333)	-	1800 (8000)	-
Flow 0.01 inches (0.25 mm)	8	18	8	16	8	14
Air Voids , %	3	5	3	5	3	5
Voids in Mineral Aggregate	(รูปที่ 2.1)					

ที่มา : Roberts et al. (1996)

ข้อดีที่พบในวิธีมาร์แชลก็คือการให้ความสำคัญกับความหนาแน่นและปริมาณช่องว่างของส่วนผสมหรือก็คือการพิจารณาถึงคุณสมบัติทางด้านปริมาตรของส่วนผสมนั่นเอง การพิจารณาค่าเหล่านี้จะช่วยให้มั่นใจได้ว่าส่วนผสมที่ได้จะสามารถนำไปใช้งานได้ดีเมื่อต้องรองรับปริมาณการจราจรที่ประมาณไว้ และข้อดีอีกข้อหนึ่งของวิธีนี้ก็คือเครื่องมือที่ใช้มีราคาไม่แพงและสะดวกในการติดตั้ง ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพงานในการก่อสร้างได้

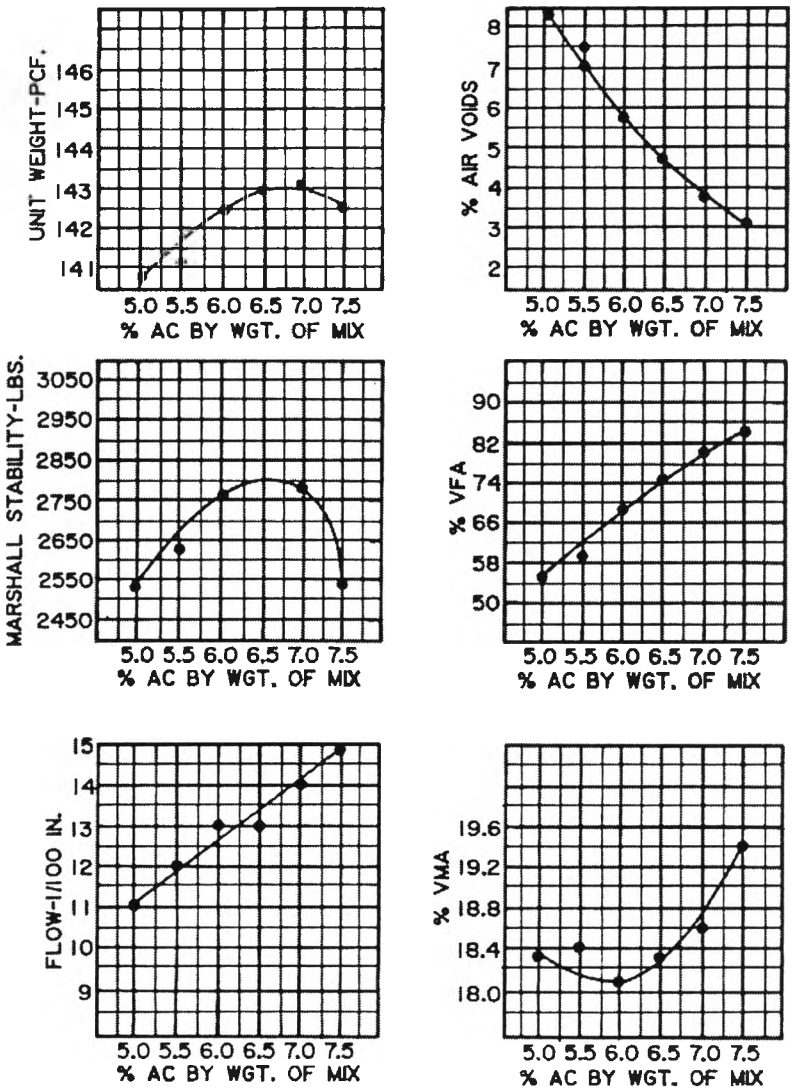


[1]Standard Specification for *Wire Cloth Sieves for Testing Purposes*, ASTM Designation E11 (AASHTO Designation M92).
[2]For processed aggregate, the nominal maximum particle size is the largest sieve size listed in the applicable specification upon which any material is retained.
[3]Mixture in the 1% tolerance band shall be permitted only when experience indicates that the mixture will perform satisfactorily and when all other criteria are met.

รูปที่ 2.1 ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมที่น้อยที่สุด

ที่มา : Roberts et al. (1996)

สำหรับข้อเสียของวิธีนี้ก็คือการบดอัดที่ใช้การปล่อยก้อนน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่างนั้นไม่ได้เป็นการจำลองการบดอัดที่เกิดขึ้นจริงบนถนนเลย และยิ่งกว่านั้น ค่าเสถียรภาพของมาร์แชลไม่เพียงพอที่จะบอกถึงความต้านทานต่อแรงเฉือนของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ จากทั้งเหตุผลทั้ง 2 ข้อนี้ทำให้ยากที่จะมั่นใจได้ว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้มีความแข็งแรงทนทานในการใช้งานหรือไม่



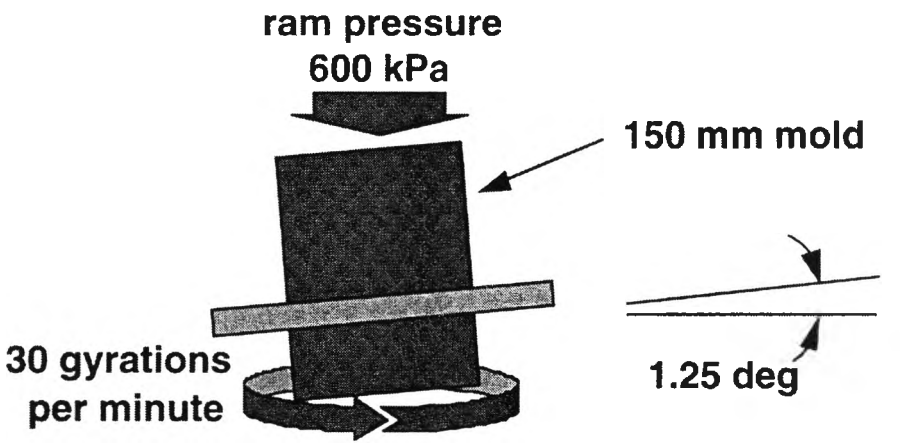
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากวิธีมาร์แชล

ที่มา : Roberts et al. (1996)

2.2.2 การออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

วิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟนี้เป็นผลที่ได้จาก Strategic Highway Research Program (SHRP) โดยมีวัตถุประสงค์เบื้องต้นก็เพื่อพัฒนาหาวิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่สอดคล้องกับการใช้งานที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ทำให้ในกระบวนการบดอัดก้อนตัวอย่างได้นำ Superpave Gyratory Compactor (SGC) มาใช้ในการบดอัด เนื่องจาก

ลักษณะของการบดอัดที่พยายามทำให้มีความใกล้เคียงกับลักษณะที่เกิดขึ้นในสนามจากรถบดถนน หรือจากปริมาณจราจร ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการบดอัดด้วย SGC โดยที่การทำงานของเครื่องตามมารตรฐานในการบดอัดจะใช้แรงดัน 600 kPa หมุนในอัตรา 30 รอบต่อนาที ด้วยมุมเอียง 1.25 องศา



รูปที่ 2.3 ลักษณะการบดอัดของ Superpave Gyratory Compactor (SGC)
ที่มา : Asphalt Institute (1996)

ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีนี้ จะแบ่งระดับของวิธีการออกแบบที่ใช้ได้เป็น 3 ระดับด้วยกันคือ ระดับ 1 ระดับ 2 และระดับ 3 ซึ่งแต่ละระดับจะขึ้นกับปริมาณการจราจรที่ต้องการรองรับ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

จากตารางที่ 2.2 การหาคุณสมบัติทางด้านปริมาตร (Volumetric Mix Design) จะเป็นกระบวนการพื้นฐานที่ต้องทำไม่ว่าจะใช้กับปริมาณการจราจรเท่าไรก็ตาม ซึ่งจะประกอบด้วยการบดอัดก้อนตัวอย่างด้วย SGC แล้วทำการคำนวณคุณสมบัติทางด้านปริมาตรต่างๆของก้อนตัวอย่างที่มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์แตกต่างกันไป แล้วทำการคัดเลือกความเหมาะสมของขนาดคละที่ใช้และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติทางด้านปริมาตรตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้ เมื่อปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นก็จะเป็นการออกแบบในระดับ Intermediate Analysis ซึ่งก็ยังมีคุณสมบัติทางด้านปริมาตรเป็นพื้นฐานแต่จะเพิ่มการทดลองที่ใช้ Superpave Shear Tester (SST) และ Indirect Tensile Tester (IDT) เข้าไปด้วยเพื่อใช้ในการทดสอบหาสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต

เพื่อช่วยในการพิจารณาออกแบบ ในระดับ Complete Analysis เป็นระดับที่ใช้เมื่อต้องการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตของถนนที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรที่มีค่ามาก จะนำ SST และ IDT มาใช้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า เพื่อผลในการทำนายสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่น่าเชื่อถือมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 ระดับในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ

Level	Superpave	Traffic , ESALs[1]	Testing Requirements[2]
I	Volumetric Mix Design	10^6	Materials selection and Volumetric proportioning
II	Intermediate Analysis	10^7	Volumetric mix design + Performance prediction tests
III	Complete Analysis	$> 10^7$	Volumetric mix design + Enhanced performance prediction tests

[1]Can be adjusted as an agency option.

[2]In all cases, moisture susceptibility is evaluated using AASHTO T283.

ที่มา : Asphalt Institute (1996)

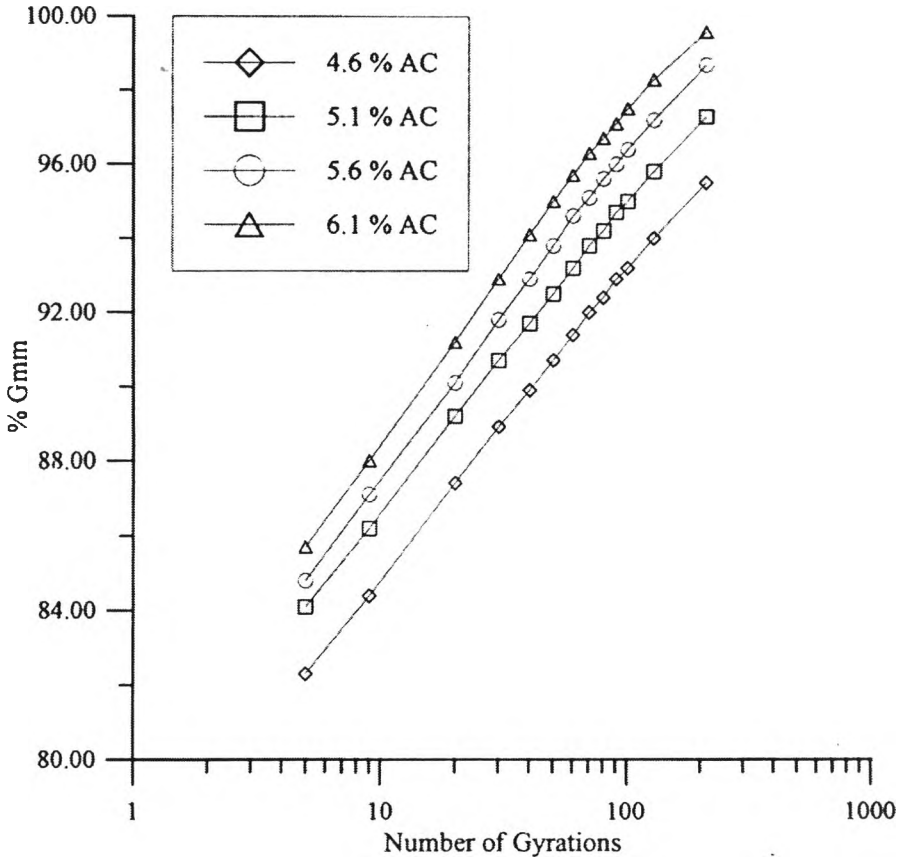
เนื้อหาในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงการออกแบบในขั้นตอนของการหาคุณสมบัติทางด้านปริมาตรหรือ Level I mix design ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยจะใช้ SGC ในการบดอัดก้อนตัวอย่างในลักษณะของการหมุนปาด (Gyration) ส่วนผสมพร้อมกับแรงกดในแนวตั้งเพื่ออัดก้อนตัวอย่าง โดยที่จะมีการกำหนดจำนวนรอบในการบดอัดมา 3 ค่าคือ จำนวนรอบที่ออกแบบ (N_{des}: design number) จำนวนรอบเริ่มต้น (N_{ini}: initial number) และจำนวนรอบสูงสุด (N_{max}: maximum number) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณการจราจรและอุณหภูมิอากาศสูงสุดโดยเฉลี่ยของบริเวณที่นำไปใช้งาน ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งค่าทั้ง 3 ค่านี้จะนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของส่วนผสมซึ่งเป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกด้วย

ตารางที่ 2.3 จำนวนรอบในการบดอัด

Design ESALs (millions)	Average Design High Air Temperature											
	< 39°C			39 – 40°C			41 – 42°C			43 – 44°C		
	N_{ini}	N_{des}	N_{max}	N_{ini}	N_{des}	N_{max}	N_{ini}	N_{des}	N_{max}	N_{ini}	N_{des}	N_{max}
< 0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3-1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1-3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3-10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10-30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30-100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
> 100	9	143	235	10	158	262	10	165	275	10	172	288

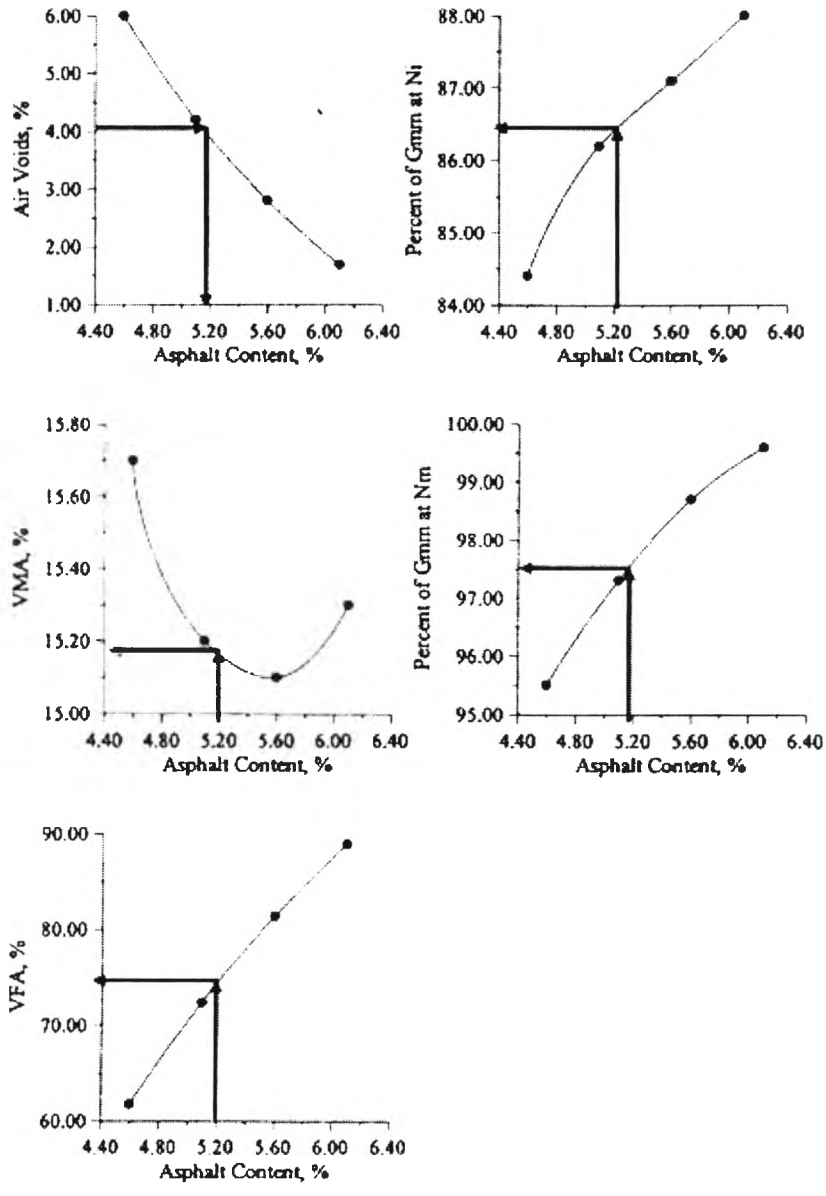
ที่มา : Asphalt Institute (1996)

ภายหลังจากการบดอัดจนถึงจำนวนรอบสูงสุด(N_{max})ของแต่ละส่วนผสมที่ทำการทดลองเปลี่ยนค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ข้อมูลจากการบดอัดจะถูกนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและร้อยละความหนาแน่นของส่วนผสม (G_{mm}) ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.4 จากนั้นจะหาค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าปริมาณช่องว่างของอากาศร้อยละ 4 หรือที่ร้อยละ 96 ของความหนาแน่นของส่วนผสมที่จำนวนรอบการบดอัดที่ออกแบบ (N_{des}) เมื่อได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์แล้วจะทำการหาค่าร้อยละความหนาแน่นของส่วนผสมที่จำนวนรอบเริ่มต้น(N_{ini}) และจำนวนรอบสูงสุด(N_{max}) ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 89 และร้อยละ 98 ตามลำดับ จากนั้นจะทำการประมาณหาค่าคุณสมบัติทางด้านปริมาตรอื่นๆคือ ปริมาณช่องว่างในมวลรวม(VMA) และปริมาณช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์(VFA) โดยใช้กราฟดังรูปที่ 2.5 แล้วเปรียบเทียบกับข้อกำหนดที่มีอยู่ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและร้อยละความหนาแน่นของส่วนผสม

ที่มา : Roberts et al. (1996)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการหาคุณสมบัติต่างๆที่ค่าของแอสฟัลต์ซีเมนต์
ที่ให้ค่าช่องว่างของอากาศร้อยละ 4.0

ที่มา : Roberts et al. (1996)

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดสำหรับปริมาณช่องว่างในมวลรวม(VMA)

Nominal Maximum Aggregate Size , mm	Minimum VMA , percent
9.5	15.0
12.5	14.0
19.0	13.0
25.0	12.0
37.5	11.0

ที่มา : Asphalt Institute (1996)

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดสำหรับปริมาณช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์(VFA)

Traffic, million ESALs	Design VFA , percent
< 0.3	70-80
< 1	65-78
< 3	65-78
< 10	65-75
< 30	65-75
< 100	65-75
$\geq$ 100	65-75

ที่มา : Asphalt Institute (1996)

ในขั้นตอนสุดท้าย จะนำส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ไปทดสอบหาค่า Tensile Strength Ratio (TSR) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T283 ซึ่งส่วนผสมที่ต้องการควรมีค่า TSR มากกว่าร้อยละ 80