

## โครงการวิจัยย่อยลำดับที่ 15

เรื่อง การประยุกต์วิศวกรรมทราฟฟิกในเครือข่ายของประเทศไทย  
(กรณีศึกษา การจำลองมหภาคสำหรับเครือข่ายถนนที่มีการเคลื่อนที่แบบวิวิธพันธุ์)

Traffic Engineering Applications in Thailand's Network

(Case study : Macroscopic modelling for road network with heterogeneous mobility)

ผู้รับผิดชอบโครงการ ผศ. ดร.เชาวนดิศ อัสวกุล

chaodit.a@chula.ac.th

### 1. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาแบบจำลองต่างๆ ทั้งแบบจำลองมหภาค และ แบบจำลองจุลภาค
2. ออกแบบแบบจำลองมหภาคสำหรับเครือข่ายจราจรที่คิดแยกประเภทยานพาหนะได้
3. ทดสอบ และวิเคราะห์แบบจำลองที่คิดค้นขึ้น โดยเทียบผลการจำลองกับข้อมูลจริงของเครือข่ายจราจรในประเทศไทยว่าสอดคล้องกันหรือไม่
4. รวบรวมข้อมูล, สรุปผลและจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดเพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐาน ในการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายจราจรของประเทศไทยต่อไป

### 2. แนวคิดและเหตุผล

ตั้งแต่ที่มนุษย์ได้เริ่มพัฒนาระบบขนส่งด้วยเครื่องจักร ใช้น้ำมันเป็นครั้งแรกในยุโรปจนถึงปัจจุบัน แม้ว่าเทคโนโลยีในการออกแบบพาหนะจะพัฒนาไปเพียงใด แต่ก็ไม่ได้ทำให้ปัญหาทางการขนส่งหรือจราจรลดลงเลย แต่กลับจะยิ่งทวีความรุนแรงขึ้น โดยเฉพาะในเขตเมืองใหญ่หรือเมืองหลวง ซึ่งบอกโดยนัยได้ว่าการแก้ปัญหาจราจรนั้น ไม่อาจทำได้ด้วยเทคโนโลยีทางวิศวกรรมอย่างเดียว แต่จำเป็นต้องอาศัยการวางแผนระบบจราจร โดยศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทราบต้นเหตุของปัญหาและวิธีจัดการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการคาดคะเนลอยๆ และสรุปอย่างง่าย ๆ จนนำไปสู่การสูญเสียสิ้นเปลืองทั้งทรัพยากรเวลาและแรงงาน ซึ่งจะมี 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือการหาความต้องการใช้เส้นทางโดยพิจารณาจากภาพรวมทั้งเครือข่าย

การคำนวณคาดคะเนสภาพการติดขัดของเส้นทางนั้นเมื่อเกิดความต้องการที่แน่นอนเข้ามาในงานวิจัยนี้จะเน้น ไปในข้อ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาปัญหาในเส้นทางจราจรที่มีปัญหาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาหาสาเหตุและแนวทางการแก้ไขที่เหมาะสม

การแก้ปัญหาจราจรในท้องถิ่นหรือประเทศใดนั้นควรให้ผู้ที่อยู่ในท้องถิ่นหรือประเทศนั้นเป็นผู้ทำการศึกษาปัญหาและหาแนวทางแก้ไข เพราะคนในท้องถิ่นหรือประเทศอื่นก็มักมีปัญหาของท้องถิ่นนั้นให้แก้ไขเช่นกัน อีกประการหนึ่งคือ ความซับซ้อนและแก่นแท้ของปัญหาในท้องถิ่นใดคนในท้องถิ่นที่ประสบปัญหานั้นย่อมเข้าใจและเข้าถึงได้ดีกว่าคนต่างถิ่นอย่างแน่นอน เช่นระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรอัตโนมัติ ประเทศไทยได้นำเข้าจากประเทศอังกฤษเป็นเงินหลายล้านบาทแต่ไม่อาจแก้ปัญหาได้ ช้ำยังทำให้เกิดปัญหามากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งก็เป็นเพราะการออกแบบระบบใดที่ย่อมต้องออกแบบให้เข้ากับปัญหาหรือ

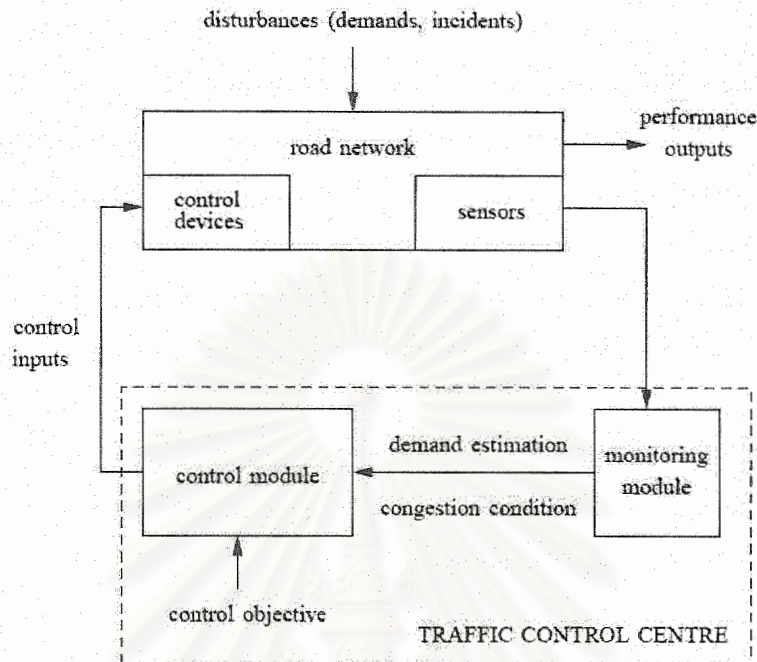
สภาพแวดล้อมของท้องถิ่นนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเปล่าประโยชน์ จึงสมควรที่ชาวไทยจะศึกษา และแก้ปัญหาของประเทศไทยเอง เป็นการแก้ปัญหาที่ถูกต้องและประหยัดเงินตราแผ่นดินที่จะนำไปซื้อ เทคโนโลยีจากต่างประเทศได้ด้วย

เครือข่ายจราจรมีลักษณะสำคัญประการหนึ่งคือแต่ละส่วนจะมีความสัมพันธ์กันทั้งหมด สภาพการจราจรติดขัดที่เกิดขึ้นในเครือข่ายจราจร โดยเฉพาะเส้นทางที่ความต้องการใช้มากเกินปริมาณถนนจะส่งผลกระทบต่อสภาพการจราจรในเครือข่ายทั้งหมด โดยจะค่อยๆส่งผลในบริเวณรอบข้างก่อนจากนั้นจึงส่งผลในบริเวณห่างไกลต่อไป การแก้ไขหรือฟื้นคืนสภาพการจราจรให้กลับคืนสู่สภาพปกติทำได้ยากและต้องใช้เวลาในการแก้ไขมากซึ่งตรงกันข้ามกับการป้องกันสภาพการติดขัดที่กระทำได้ง่ายกว่า จึงจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่ใช้ทำนายสภาพการจราจรล่วงหน้าเพื่อป้องกันสภาพการจราจรติดขัดแทนการตรวจสอบสภาพการจราจรและแก้ไข แต่การพิจารณาสภาพการจราจรแยกส่วนจะก่อให้เกิดปัญหาการติดขัดในส่วนอื่นที่ไม่ได้พิจารณาและการติดขัดนั้นจะทำให้ทั้งเครือข่ายติดขัดตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องมีแบบจำลองที่สามารถพิจารณาทั้งเครือข่ายเป็นตัวควบคุมป้อนกลับให้สภาพจราจรอยู่ในสภาพปกติโดยการทำนายสภาพการจราจรของโครงข่ายล่วงหน้ารวมถึงคำนวณหาวิธีการป้องกันหรือแก้ไขสภาพการจราจรติดขัดซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ ITS (Intelligence Transport System)

นอกจากการประยุกต์แบบจำลองการเคลื่อนที่กับปัญหาด้านจราจรแล้ว แบบจำลองที่ได้ยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบระบบสื่อสารเคลื่อนที่ต่างๆ อีกด้วยเช่น ในการสื่อสารผ่านรถยนต์ สภาพจราจรที่ได้จากแบบจำลองจะช่วยจำลองการทดลองประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลแทนการเก็บค่าข้อมูลจริงจากรถยนต์บนถนนได้

เพื่อให้สามารถจำลองระบบถนนทั้งเครือข่ายได้ แนวทางงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองมหภาคเนื่องจากแบบจำลองจุลภาคนั้นทำการเก็บรวบรวมข้อมูลให้ครบถ้วน ได้ยากในทางปฏิบัติ ทั้งยังต้องการความแม่นยำของข้อมูลในระดับสูง และเมื่อนำไปใช้ในระดับเครือข่ายแล้ว ความซับซ้อนของแบบจำลองและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะยิ่งทวีคูณกว่าแบบจำลองมหภาคมาก แบบจำลองมหภาคจึงมีความเหมาะสมมากกว่าในทางปฏิบัติ

แบบจำลองมหภาคที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบจำลองการส่งผ่านแบบเซลล์ (Cell Transmission Model) หรือ CTM เนื่องจากเป็นแบบจำลองมหภาคชนิด first-order ที่แม้จะมีความแม่นยำในการทำนายน้อยกว่าแบบจำลองมหภาคชนิด higher order เล็กน้อย แต่ใช้เวลาและขั้นตอนการคำนวณที่น้อยกว่ารวมทั้งมีความง่ายในการเก็บข้อมูลมากกว่า ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวตรวจสอบที่สามารถวัดความเร็วได้ และยังสามารถทดสอบความถูกต้องจากข้อมูลโครงข่ายจราจรจริงแล้ว ที่สำคัญคือแบบจำลอง CTM นั้นได้พัฒนาเพิ่มเติมมาจากแบบจำลอง LWR ซึ่งได้รับความนิยม



รูปที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของตัวควบคุมเครือข่ายแบบป้อนกลับ

แนวทางการพัฒนาแบบจำลองจะทำการพัฒนาแบบจำลองให้สามารถจำแนกประเภทของยานพาหนะได้ เนื่องจากมีงานในหลายด้านที่ต้องการการจำแนกประเภทของยานพาหนะเช่นการศึกษาความปลอดภัยในการใช้ถนนกับ Traffic Flow ปัจจัยที่มีผลต่อความปลอดภัยไม่ได้ขึ้นกับความหนาแน่นของระบบจราจรเท่านั้นแต่ขึ้นกับชนิดของยานพาหนะที่อยู่ในระบบจราจรนั้นๆด้วย และเนื่องจากถนนบางเส้นได้มีการจำกัดชนิดของยานพาหนะไม่เหมือนกันทำให้ถ้าไม่พิจารณาชนิดของยานพาหนะแล้วจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ค่อนข้างสูง

### 3. Cell Transmission Model

แบบจำลองนี้ใช้หลักการของไหลด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 ซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลอง LWR ทำให้ง่ายต่อความเข้าใจ มีความซับซ้อนน้อย จึงสามารถนำไปใช้และปรับปรุงได้ง่าย CTM นั้นมองปริมาณยานพาหนะเป็นแบบจำลองมหภาค โดยจะแบ่งถนนออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่าเซลล์มาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน โดยสิ่งที่พิจารณาหลักมีดังนี้

1. การแบ่งเซลล์ของถนนที่มีทางแยกจะต้องพิจารณาตรงจุดที่มีการเชื่อมทางแยกเป็นจุดแบ่งเซลล์เสมอ เพื่อความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง
2. ขนาดของเซลล์ที่แบ่งต้องเล็กพอ โดยที่ ยานพาหนะแต่ละคันไม่สามารถเคลื่อนที่กระโดดข้ามเซลล์ได้ นั่นคือ หากมีเซลล์ 3 เซลล์ ซึ่งอยู่ติดกัน และมีการเคลื่อนที่จากเซลล์ที่ 1 ไปเซลล์ที่ 3 แล้ว ยานพาหนะทุกคัน ต้องไม่สามารถเคลื่อนที่จากเซลล์ที่ 1 ไปยังเซลล์ที่ 3 ทันทีได้ จะต้องมีการผ่านเซลล์ที่ 2



ด้วยเสมอ เพราะฉะนั้น ความยาวของเซลล์ จึงถูกกำหนดด้วยความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ในเซลล์นั้นคูณด้วย เวลา 1 หน่วยของแบบจำลอง

3. การกำหนดขนาด 1 หน่วยเวลาของแบบจำลองจะพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของสภาพจราจร เช่น ถ้าบริเวณแยกที่พิจารณามีการเปลี่ยนสัญญาณไฟที่ค่อนข้างเร็วก็ควรให้ 1 หน่วยเวลาของแบบจำลองมีค่าน้อยเพื่อที่แบบจำลองสามารถเปลี่ยนแปลงตามสภาพของเครือข่ายจราจรได้ทัน

เมื่อหาความยาวที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แต่ละเซลล์ และแบ่งเซลล์ได้เรียบร้อยแล้ว ก็จะนำรูปแบบของเซลล์ที่ได้ มาคำนวณต่อไป โดยทั้งนี้การแบ่งเซลล์ไม่มีความจำเป็นต้องมีขนาดเท่ากันทุกเซลล์ การคำนวณการไหลของยานพาหนะ

การคำนวณการไหลของยานพาหนะระหว่างเซลล์ต่างๆ นั้นจะต้องพิจารณาลักษณะการเชื่อมต่อของเซลล์ต่างๆ เป็นสำคัญ โดยสามารถแบ่งลักษณะการเชื่อมต่อของเซลล์ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

1. การเชื่อมต่อแบบปกติ
2. การเชื่อมต่อแบบรวม
3. การเชื่อมต่อแบบแยก

ในการคำนวณการไหลของยานพาหนะระหว่างเซลล์ในแต่ละรูปแบบนั้น จะมีการคำนวณพื้นฐานจากค่า 2 ค่าด้วยกัน คือ ประสิทธิภาพในการส่ง และประสิทธิภาพในการรับ

ประสิทธิภาพในการส่งนั้น คือ ความสามารถของเซลล์ต้นทางที่จะเคลื่อนยานพาหนะไปยังเซลล์ปลายทางได้ ส่วนประสิทธิภาพในการรับนั้น จะหมายถึงความสามารถของเซลล์ปลายทางที่จะรองรับยานพาหนะที่เคลื่อนมาได้ ซึ่งตัวแปรทั้ง 2 ตัวนี้ จะเป็นตัวแปรพื้นฐานในการคำนวณปริมาณการไหลของยานพาหนะในทุกๆ รูปแบบ ซึ่งการคำนวณหาค่าของตัวแปรทั้ง 2 ตัวนั้น มีดังนี้

#### ประสิทธิภาพในการส่ง

จำนวนยานพาหนะที่เซลล์สามารถส่งได้มี 2 ส่วน คือ ปริมาณยานพาหนะทั้งหมดที่มีอยู่ในเซลล์นั้น และ ปริมาณยานพาหนะสูงสุดที่สามารถเคลื่อนที่ได้ใน 1 หน่วยเวลา หรือสามารถเขียนเป็นสูตรคำนวณได้ดังนี้

$$S_i = \min\{n_i, Q\} \quad (1)$$

$S_i$  = ประสิทธิภาพในการส่งของเซลล์ที่  $i$

$n_i$  = จำนวนยานพาหนะของเซลล์ที่  $i$  ในช่วงเวลานั้น

$Q$  = จำนวนยานพาหนะสูงสุดที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายใน 1 หน่วยเวลา

#### ประสิทธิภาพในการรับ

ในการหาประสิทธิภาพในการรับยานพาหนะของเซลล์ต่างๆนั้น จะพิจารณาจาก ขนาดของพื้นที่ว่างในเซลล์นั้น และ จำนวนยานพาหนะสูงสุดที่สามารถรับได้ใน 1 หน่วยเวลา หรือ สามารถเขียนเป็นสูตรคำนวณได้ดังนี้

$$R_i = \min\{Q, \delta_i(N_i - n_i)\} \quad (2)$$

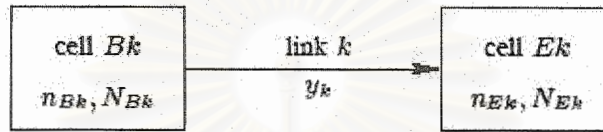
$R_i$  = ประสิทธิภาพในการรับของเซลล์ที่  $i$

$N_i$  = ปริมาณความจุสูงสุดของเซลล์ที่  $i$

$\delta_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของยานพาหนะ

หลังจากที่ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพการรับและส่งของเซลล์ต่างๆแล้ว ก็จะคำนวณจำนวนยานพาหนะที่ไหลระหว่างเซลล์ต่างๆโดยพิจารณาจากลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์นั้นๆ ซึ่งวิธีการคำนวณนั้นก็แตกต่างกันออกไป ดังนี้

### 3.1 การเชื่อมต่อปกติ



รูปที่ 2 ภาพการเชื่อมต่อแบบปกติ

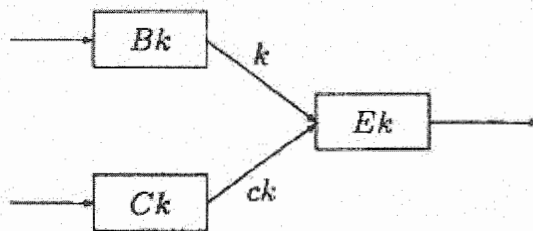
คือการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ 2 เซลล์ ซึ่งอยู่ติดกัน และมีการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์เพียง 1 การเชื่อมต่อ โดยที่เซลล์ซึ่งเป็นเซลล์ปลายทางนั้น มีการรับปริมาณยานพาหนะจากเซลล์ต้นทางเพียง 1 เซลล์ และเซลล์ต้นทางนั้นๆ ก็มีเซลล์ปลายทางเพียง 1 เซลล์ เช่นกัน

จากลักษณะการเชื่อมต่อเช่นนี้แล้ว สามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมต่อแบบปกตินี้คือการเชื่อมต่อของเซลล์ซึ่งอยู่บนทางตรงของถนนเส้นหนึ่ง ซึ่งไม่มีการแบ่งเลนออกไปตามเส้นทางการวิ่งของยานพาหนะนั้นเอง\par ในการคำนวณจำนวนยานพาหนะที่สามารถเคลื่อนที่ได้สำหรับการเชื่อมต่อแบบปกตินี้ จะคำนวณจากประสิทธิภาพในการส่งและประสิทธิภาพในการรับของเซลล์ทั้ง 2 แล้วจึงหาค่าน้อยที่สุดระหว่าง 2 ค่านี้ แล้วจึงนำค่าน้อยที่สุดมาเป็นค่าจำนวนยานพาหนะที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรการคำนวณได้ดังนี้

$$y_k = \min\{S_{Bk}, R_{Ek}\} \quad (3)$$

$y_k$  = จำนวนยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์  $Ek$  โดยมีเซลล์  $Bk$  เป็นเซลล์ต้นทาง

### 3.2 การเชื่อมต่อแบบรวม



รูปที่ 3 ภาพการเชื่อมต่อของเซลล์แบบรวม

คือการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ 3 เซลล์ โดยมีเซลล์ต้นทาง 2 เซลล์ และเซลล์ปลายทาง 1 เซลล์ (เนื่องจากในสภาพความเป็นจริงนั้น การรวมกันจะเกิดจากเซลล์เพียง 2 เซลล์เท่านั้น ดังนั้นในกรณีของการรวมกัน จะมีเซลล์ต้นทางเพียงแค่ 2 เซลล์ เท่านั้น)

จากลักษณะการเชื่อมต่อดังกล่าว จะต้องพิจารณาถึงพื้นที่ว่าง และความสัมพันธ์ระหว่างการรวมกันของยานพาหนะด้วย ซึ่งจะต้องทราบ อัตราส่วนการรวมตัว  $p$  ระหว่างเซลล์ทั้ง 2 ก่อน จากนั้น จึงพิจารณาถึงพื้นที่ว่างในเซลล์ปลายทาง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี

- เซลล์ปลายทางมีพื้นที่ว่างมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณยานพาหนะที่จะส่งเข้ามา

นั่นคือ เซลล์ต้นทางทั้งสองสามารถป้อนยานพาหนะให้กับเซลล์ปลายทางได้ทั้งหมด โดยสามารถสรุปเป็นสูตรการคำนวณ ได้ดังนี้

$$y_{Ek} = S_{Bk} + S_{Ck} \quad (4)$$

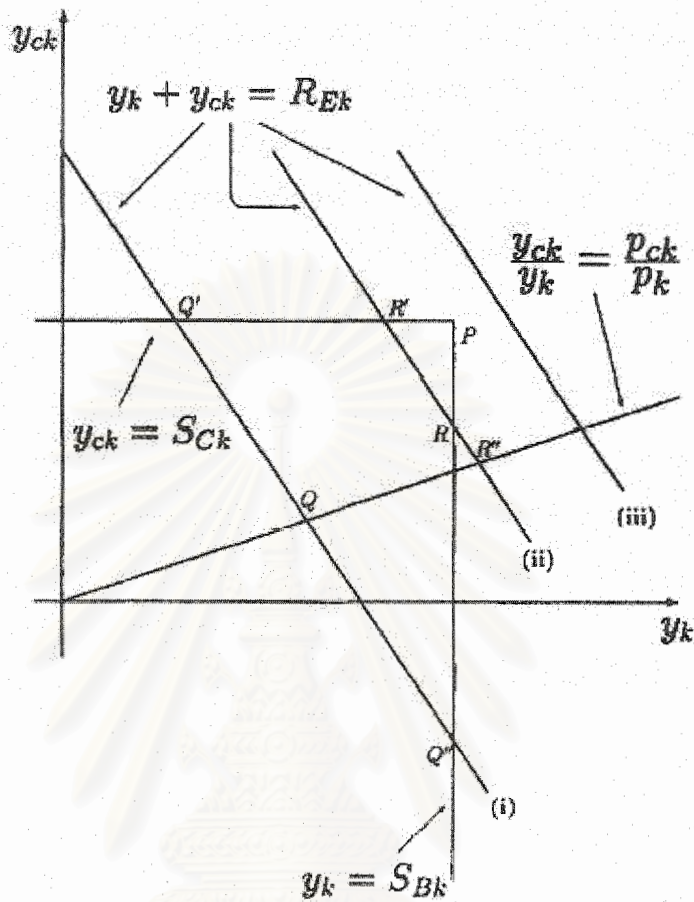
โดยที่  $R_{Ek} \geq S_{Bk} + S_{Ck}$

- เซลล์ปลายทางมีพื้นที่ว่างน้อยกว่าปริมาณยานพาหนะที่จะส่งเข้ามา

ในกรณีนี้ ยานพาหนะทั้งหมดที่จะส่งมาจากเซลล์ต้นทางนั้น จะไม่สามารถเข้าไปยังเซลล์ปลายทางได้ทั้งหมด จึงทำให้การคำนวณนั้นมีความซับซ้อนมากกว่ากรณีแรก

จะได้กราฟลักษณะความสัมพันธ์ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของปริมาณยานพาหนะที่สามารถเคลื่อนที่ได้จากเซลล์ต้นทางทั้ง 2

ในการพิจารณาปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์ปลายทางนั้น จะคำนึงถึงสมการซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ 2 สมการด้วยกัน คือ

$$y_k + y_{ck} = R_{Ek} \quad (5)$$

$$\frac{y_{ck}}{y_k} = \frac{P_{ck}}{P_k} \quad (6)$$

ซึ่งเมื่อนำสมการ (5) - (6) มาเขียนลงบนกราฟ ประกอบกับเส้นจำกัดขอบเขตของปริมาณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ( $y_k = S_k, y_{ck} = S_{ck}$ ) จะได้ตามรูปที่ 4

จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้นั้นจะพบว่า มีสมการเพียงเส้นเดียวที่สามารถเคลื่อนที่ได้ นั่นก็คือ  $y_k + y_{ck} = R_{Ek}$  ซึ่งจะเกิดการเคลื่อนที่ตามค่า  $R_{Ek}$  โดยที่สามารถแบ่งลักษณะของ  $R_{Ek}$  ได้ 3 กรณี คือ

เมื่อ  $R_{Ek}$  มีขนาดน้อยเกินกว่าจะให้ flow ใดสามารถผ่านไปได้อย่างหมด

เมื่อ  $R_{Ek}$  มีขนาดเพียงพอให้ flow ใด flow หนึ่งเข้ามาได้ทั้งหมดเพียง flow เดียว



เมื่อ  $R_{EK}$  มีขนาดเพียงพอที่รับ flow ทั้ง 2 flow เข้ามาในเซลล์ได้ทั้งหมด

สำหรับกรณีที่ 1 นั้นจะพบว่าปริมาณยานพาหนะที่ไหลเข้าสู่เซลล์ปลายทางนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้น

ตามความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ต้นทางทั้ง 2  $\left(\frac{y_{ck}}{y_k} = \frac{p_{ck}}{p_k}\right)$  จนมาติดกับสมการซึ่งบอกถึงพื้นที่ว่างในเซลล์ปลายทาง ( $y_k + y_{ck} = R_{EK}$ ) นั้นหมายถึงว่าจุดที่จะบ่งบอกขนาดของ flow จากเซลล์ต้นทางทั้งสองคือจุด Q นั้นเอง สำหรับกรณีที่ 2 ปริมาณยานพาหนะที่ไหลเข้าสู่เซลล์ปลายทางจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เหมือนกับของกรณีที่ 1 จนมาถึงจุดติดกับสมการควบคุม flow ( $y_k = S_k$ ) แต่เนื่องจากยังไม่ติดกับสมการซึ่งบอกพื้นที่ว่างของเซลล์ปลายทาง ดังนั้นปริมาณยานพาหนะที่ไหลเข้าที่เหลือ จะเป็นของเซลล์ต้นทางอีกเซลล์หนึ่ง ทำให้จุดที่จะบ่งบอกถึงปริมาณยานพาหนะที่ไหลจากเซลล์ต้นทางทั้งสองคือจุด R และในกรณีที่ 3 นั้น เนื่องจากปริมาณยานพาหนะที่เซลล์ปลายทางสามารถรับได้นั้นมีมากกว่าจำนวนยานพาหนะทั้งหมดที่เซลล์ต้นทางสองสามารถส่งไปได้ ดังนั้น จุดที่บ่งบอกถึงปริมาณยานพาหนะที่เซลล์ต้นทางทั้งสองสามารถส่งไปได้คือ จุด P ซึ่งเป็นกรณีเดียวกันกับ เซลล์ปลายทางมีพื้นที่ว่างมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณยานพาหนะที่จะส่งเข้ามานั้นเอง

จากกรณีทั้ง 3 นั้น เมื่อพิจารณาเฉพาะสองกรณีแรกนั้นจะพบว่าจุดที่ต้องการนั้นเป็นจุดกลางระหว่างจุด 3 จุดคือ Q', Q, Q" และ R', R, R" ดังนั้น สามารถเขียนสรุปเป็นสมการได้ว่า

$$y_k = \text{mid}\{S_k, R_{EK} - S_{ck}, p_k R_{EK}\} \quad (7)$$

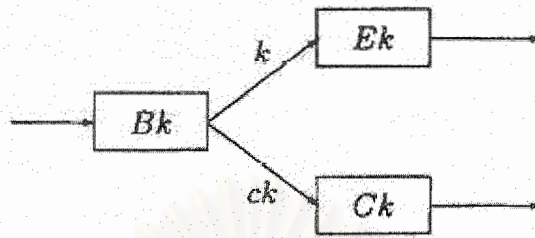
$$y_{ck} = \text{mid}\{S_{ck}, R_{EK} - S_k, p_{ck} R_{EK}\} \quad (8)$$

$$\text{เมื่อ } R_{EK} < S_k + S_{ck}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3.3 การเชื่อมต่อแบบแยก



รูปที่ 5 ภาพการเชื่อมต่อของเซลล์แบบแยก

เป็นการเชื่อมต่อของเซลล์ตั้งแต่ 3 เซลล์ขึ้นไปแต่ละจะเป็นเซลล์ต้นทาง 1 เซลล์และที่เหลือเป็นเซลล์ปลายทาง ซึ่งในสภาพการจราจรจริงนั้น รูปแบบการต่อแบบนี้ ก็คือทางแยกนั่นเอง ซึ่งในการ

คำนวณนั้นจะต้องพิจารณาอัตราส่วนของการแบ่งปริมาณยานพาหนะไปตามเส้นทางต่างเพิ่มขึ้น ด้วย เพราะฉะนั้นสมการ ในการคำนวณสำหรับการเชื่อมต่อแบบนี้ คือ

$$y_k = \min \left\{ S_{bk}, \frac{R_{EK}}{\beta_{EK}}, \frac{R_{CK}}{\beta_{CK}} \right\} \quad (9)$$

$$y_k = \beta_{EK} y_{EK} \quad (10)$$

$$y_{ck} = \beta_{CK} y_{CK} \quad (11)$$

$\beta_{EK}, \beta_{CK} =$  อัตราส่วนในการแบ่งจำนวนไปตามเซลล์ทั้งสอง การเพิ่มสัญญาณไฟจราจร

เป็นการใส่ฟังก์ชันที่เซลล์ที่มีสัญญาณไฟจราจรเพื่อความถูกต้องแม่นยำ โดยที่สัญญาณไฟจราจรจะมีผลต่อค่า  $Q$  ของเซลล์นั้นๆ

$$Q(i) = \begin{cases} Q_{\max} & , \text{Light Signal} = 1 \quad (\text{green light}) \\ 0 & , \text{Light Signal} = 0 \quad (\text{red light}) \end{cases} \quad (12)$$

### 3.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์เฉพาะ

ในการคำนวณปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่ระหว่างเซลล์นั้น จะมีค่าตัวแปรบางค่าซึ่งเป็นค่าเฉพาะของเซลล์ต่างๆ ซึ่งไม่สามารถหาได้จากการคำนวณ แต่เป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลดิบจากสภาพการจราจรจริงของบริเวณนั้นๆ โดย ตัวแปรที่จะต้องพิจารณามีดังนี้

- ความจุของเซลล์

หลังจากที่ได้แบ่งเซลล์ออกเป็นช่วงๆแล้วจะต้องวัดจำนวนยานพาหนะสูงสุดที่เซลล์นั้นๆจะสามารถรับได้ โดยใช้การประมาณเปรียบเทียบจากบริเวณเซลล์ที่มียานพาหนะหนาแน่นแทนก็ได้ ทั้งนี้

เนื่องจากแต่ละเซลล์อาจจะมีขนาดไม่เท่ากัน ดังนั้น การหาความจุสูงสุดของแต่ละเซลล์นั้น จะต้องพิจารณา แยกจากกันในกรณีที่มีการแบ่งเซลล์ด้วยความยาวที่ไม่เท่ากัน

- ปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านสูงสุดได้ใน 1 หน่วยเวลา

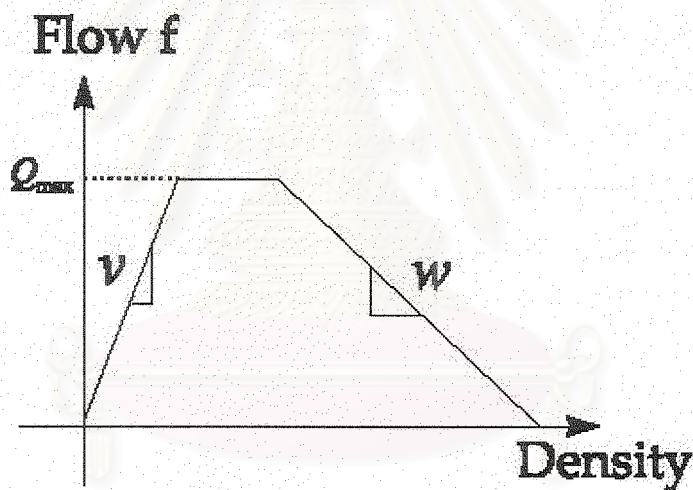
เมื่อปรับหน่วยเวลาของระบบที่จะจำลองแล้วนั้นจะต้องเก็บข้อมูล ความจุ และ ปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่ ซึ่งเมื่อได้ข้อมูลมาทั้งหมดแล้ว จึงหาค่าปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่สูงสุด มาใช้ในการวิเคราะห์ได้ทันที

- ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของยานพาหนะ

สามารถหาได้จาก Fundamental Diagram ที่สมบูรณ์โดยพิจารณาจากอัตราส่วนความชันของเส้นกำกับของ Scattering Diagram ในขาขึ้นเทียบกับขาลงตามลำดับ ในกรณีที่ไม่มี Fundametal Diagram ที่สมบูรณ์อาจใช้วิธีการ Optimization ให้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของความหนาแน่นทุกเซลล์มีค่าน้อยที่สุดเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของยานพาหนะแทนได้

- Fundamental Diagram

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความหนาแน่นของยานพาหนะในเซลล์มีชื่อว่า Fundamental Diagram ดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า density และ flow

ซึ่งจะพบว่าสามารถแบ่งความชันของกราฟได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ความชันด้านขาขึ้น  $v$  และความชันด้านขาลง  $w$  โดยที่ค่าความชันทั้ง 2 นั้นจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มและการลดของยานพาหนะ แต่เนื่องจากการเพิ่มของยานพาหนะนั้นจะมีความชันเป็น 1 เพราะได้ทำการปรับหน่วยเวลาและความยาวของเซลล์แล้ว ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มของยานพาหนะนั้นจะมีค่าเท่ากับ

$$\delta = \frac{w}{v} \quad (13)$$

#### 4. แนวทางที่เสนอในงานวิจัย

จากที่ได้กล่าวไปในข้างต้นแล้วว่าต้องการที่จะตัดแปลง CTM ให้สามารถคำนวณได้ละเอียดขึ้น โดยพิจารณาถึงผลกระทบของประเภทของพาหนะหรือ Class ที่แตกต่างกัน เพื่อลดความผิดพลาดจากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้น้อยลง โดยจะเริ่มจากสมมุติฐานดังนี้

1. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างประเภทที่ต่างกันจะมีความคล้ายคลึงกันดังเช่นของไหลต่างชนิดกันที่อยู่ปะปนกันไม่ทำปฏิกิริยาเคมีต่อกัน นั่นคือสามารถใช้ สมการทั่วไปเพียงชุดเดียวก็สามารถอธิบายการไหลร่วมกันของยานพาหนะทุกประเภทได้

2. จากหลักการความทัดเทียมกัน (principle of equivalence) และทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (Special Relativity Theory) ระบุว่า กฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์สำหรับผู้สังเกตการณ์ที่เคลื่อนที่อย่างอิสระทุกคนจะดำเนินไปเหมือนกัน ไม่ว่าผู้สังเกตการณ์แต่ละรายจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่าใดนั่นหมายความว่าไม่จำเป็นต้องมีสมการชุดใหม่เพื่ออธิบายและทำนายคุณสมบัติเฉพาะของยานพาหนะแต่ละประเภท

3. กำหนดให้มียานพาหนะ 2 ประเภทนั่นคือ Head-of-Line Vehicle และ End-of-Line Vehicle

- Head-of-Line Vehicle คือยานพาหนะที่ตกค้างในเซลล์เมื่อ Time Slot ที่แล้ว จะถือว่าพาหนะจำพวกนี้อยู่ที่ปลายเซลล์และมีความพร้อมที่จะไปได้ทั้งหมดใน Time Slot นี้

- End-of-Line Vehicle คือยานพาหนะที่เพิ่งเข้ามาจากเซลล์อื่นเมื่อ Time Slot ที่แล้ว จะมองว่ามันกระจายอยู่ในเซลล์แบบ Uniform ทำให้มีเพียงบางส่วนที่สามารถไปได้ใน Time Slot นี้ โดยขึ้นอยู่กับความเร็วของประเภทยานพาหนะที่กำลังพิจารณา

4. เวลาและอวกาศไม่ได้เป็นอิสระต่อกันแต่อยู่ร่วมกันเป็น Space-Time Domain ทำให้ที่ว่างสัมบูรณ์ไม่มีจริง แต่ต้องพิจารณาที่ว่างสัมพัทธ์แทน

สำหรับสมมุติฐานข้อที่ 4 นั้นอาจจะยากต่อการยอมรับได้และไม่สามารถมองเห็นได้โดยง่าย จะพิสูจน์ให้เห็นโดยย่อๆด้วยวิธีการเส้นขนาน ที่จะทำการยกตัวอย่างเปรียบเทียบตัวอย่างหนึ่งซึ่งใกล้เคียงขึ้นมาและจะพิสูจน์ด้วยวิธีนั้นแทนดังนี้

ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและทั่วไป (Special and General Relativity Theory) แล้ว แสงจะมีความเร็วเท่ากันหมด ไม่ว่าผู้สังเกตและแหล่งกำเนิดแสงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ต่อกันเท่าใดในทิศทางใดก็ตาม

เนื่องจากความเร็วแสงคงที่แต่ผู้สังเกตกลับเห็นการเคลื่อนที่ของสิ่งต่างๆไม่เท่ากันเมื่ออยู่ในกรอบอ้างอิงที่ไม่เหมือนกัน จึงเป็นไปได้อย่างเดี๋ย่ว่าทั้งสองจะต้องวัดระยะเวลาที่แสงเดินทางได้ไม่เท่ากันด้วย จึงเป็นต้นกำเนิดของการยืดหดของเวลา ซึ่งกล่าวได้ว่าเวลาได้เคลื่อนที่ผ่านผู้สังเกตของแต่ละกรอบอ้างอิงไม่เท่ากัน

จึงสรุปได้ว่า เวลาและอวกาศอยู่ร่วมกันเป็น Space-Time Domain ไม่ใช่ Time Domain และ Space Domain ที่เป็นอิสระต่อกัน

กลับมาที่ทฤษฎี CTM ได้ทราบมาก่อนหน้านี้แล้วว่าที่ว่างหรือ Capacity ขึ้นกับ length และมองว่า Capacity และ length เป็นอิสระจากเวลา แต่ความจริงแล้วมันอยู่ร่วมกันเป็น Space-Time Domain

ถ้ายานพาหนะที่นำหน้ายานพาหนะผู้สังเกตอยู่หุคหนึ่งไม่ว่าจะมี Space ข้างหน้ายานพาหนะที่หยุดนิ่งเพียงใด ยานพาหนะผู้สังเกตก็ไม่สามารถไปต่อได้ ในขณะที่ยานพาหนะข้างหน้าวิ่งเร็วมาก ยานพาหนะผู้สังเกตจะมีที่ว่างให้สอดแทรกเข้ามา ได้เสมอแม้ว่าจะมีที่ว่างน้อยมากหรือไม่ก็มีก็ตาม

ลองเปรียบเทียบทฤษฎีสัมพันธภาพและ CTM

สัมพันธภาพ

$$c = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (14)$$

โดย  $c$  คงที่

CTM

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{V_m} \quad (15)$$

โดย  $\Delta t$  คือ Time Slot และให้มีค่าคงที่,  $V_m$  คือความเร็วของพาหนะ  $m$

เพราะคิด Time Slot จากนั้นลองเปรียบเทียบความคล้ายคลึงของ 2 ปรากฏการณ์นี้จะพบว่า การใช้ที่ว่างของพาหนะแต่ละประเภทที่มีความเร็วต่างกันจะมีค่าไม่เท่ากัน

จึงสรุปได้ว่า ที่ว่างสัมบูรณ์ไม่มีจริง แต่จะต้องอ้างอิงสัมพัทธ์จากความเร็วของพาหนะที่ครอบครองที่ว่างในขณะนั้นเทียบกับผู้ที่ต้องการจะแทนที่

เนื่องจากการพิจารณาประเภทของพาหนะเพิ่มขึ้นมา ทำให้พารามิเตอร์ต่างๆ มีมากขึ้น จึงต้องทราบพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



$M$  = จำนวนชนิด (Class) ของยานพาหนะทั้งหมด

$N_i$  = ความจุของเซลล์  $i$

$n_{i,m}(t)$  = จำนวนพาหนะของ Class  $m$  ในเซลล์  $i$

$Q_i$  = จำนวนพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์  $i$  ได้มากสุดใน 1 Time Slot

$\tilde{n}_{i,m}(t)$  = ค่าการใช้ที่ว่างสัมพัทธ์ในเซลล์  $i$  ของ Class  $m$

$V$  = Free Flow Speed ของ Class ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งกำหนดให้เป็น Reference Speed

$V_m$  = Free Flow Speed ของ Class  $m$

$\tilde{V}_m = \frac{V_m}{V}$  = Normalized Free Flow Speed ของ Class  $m$

$R_i(t)$  = ความสามารถในการรับของเซลล์  $i$

$A_{i,m}(t)$  = จำนวน Head-of-Line Vehicle ของ Class  $m$  ในเซลล์  $i$

$B_{i,m}(t)$  = จำนวน End-of-Line Vehicle ของ Class  $m$  ในเซลล์  $i$

$\tilde{R}_i(t)$  = ความสามารถในการรับเชิงสัมพัทธ์ของเซลล์  $i$

$y_{i,m}(t)$  = จำนวนพาหนะของ Class  $m$  ที่วิ่งเข้าสู่เซลล์  $i$  เมื่อ Time Slot เปลี่ยนจาก  $t \rightarrow t+1$

$\tilde{R}_{i+1}^*(t) = \tilde{R}_{i+1}(t) - \sum_{m=1}^M A_{i,m}(t)$  = ความสามารถในการรับเชิงสัมพัทธ์ของเซลล์  $i+1$

หลังจากรับ Head-of-Line Vehicle จากเซลล์ต้นทางแล้ว

จากสมมุติฐานข้างต้นจะได้สมการ Modified CTM with Heterogeneous Mobility ดังนี้

$$\tilde{R}_{i+1}(t) = \min \left\{ Q_{i+1}, \delta_{i+1} \left[ N_{i+1} - \sum_{m=1}^M \left( \frac{n_{i+1,m}(t)}{\tilde{V}_m} \right) \right], 0 \right\} \quad (16)$$

$$n_{i,m}(t) = A_{i,m}(t) + B_{i,m}(t) \quad (17)$$

โดย

$$A_{i,m}(t) = n_{i,m}(t-1) - y_{i+1,m}(t-1) \quad (18)$$

$$B_{i,m}(t) = y_{i,m}(t-1) \quad (19)$$

จากนั้นจะแบ่งการพิจารณาตามลักษณะการเชื่อมต่อออกเป็น 3 ประเภท

#### 4.1 การเชื่อมต่อปกติ

พิจารณาเป็น 2 กรณี

1. กรณีที่เซลล์ปลายทางมีที่ว่างสัมพัทธ์น้อยกว่า Head-of-Line Vehicle ของเซลล์ต้นทาง ถ้า

$$\sum_{m=1}^M A_{i,m}(t) = \sum_{m=1}^M [n_{i,m}(t-1) - y_{i+1,m}(t-1)] \geq \tilde{R}_{i+1}(t) \quad (20)$$

จะได้

$$\sum_{m=1}^M y_{i+1,m}(t) = \tilde{R}_{i+1}(t) \quad (21)$$

$$y_{i+1,m}(t) = \frac{\tilde{V}_m A_{i,m}(t) \tilde{R}_{i+1}(t)}{\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m A_{i,m}(t)]} \quad (22)$$

2. กรณีที่เซตปลายทางมีที่ว่างพอจะรับ Head-of-Line Vehicle จากเซตต้นทางได้หมด จะพิจารณาถึง End-of-Line Vehicle ต่อ โดยแยกเป็น 2 กรณีย่อยดังนี้

เงื่อนไขของกรณีนี้เป็นไปตามสมการข้างล่างนี้

- ที่ว่างสัมพัทธ์ที่เหลือไม่สามารถรับ End-of-Line Vehicle ได้ทั้งหมด

ถ้า

$$\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{i,m}(t)] \geq \tilde{R}_{i+1}^*(t) \quad (23)$$

โดย

$$\tilde{R}_{i+1}^*(t) = \tilde{R}_{i+1}(t) - \sum_{m=1}^M A_{i,m}(t) \quad (24)$$

จะได้

$$\sum_{m=1}^M y_{i+1,m}(t) = \sum_{m=1}^M A_{i,m}(t) + \tilde{R}_{i+1}^*(t) \quad (25)$$

$$y_{i+1,m}(t) = A_{i,m}(t) + \frac{\tilde{V}_m B_{i,m}(t) \tilde{R}_{i+1}^*(t)}{\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{i,m}(t)]} \quad (26)$$

- ที่ว่างสัมพัทธ์ที่เหลือสามารถรับ End-of-Line Vehicle ได้ทั้งหมด

ถ้า

$$\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{i,m}(t)] \leq \tilde{R}_{i+1}^*(t) \quad (27)$$

จะได้

$$\sum_{m=1}^M y_{i+1,m}(t) = \sum_{m=1}^M A_{i,m}(t) + \sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{i,m}(t)] \quad (28)$$

$$y_{i+1,m}(t) = A_{i,m}(t) + \tilde{V}_m B_{i,m}(t) \quad (29)$$

สังเกตว่าสมการ (20) - (29) เมื่อ  $M=1$  จะลดรูปเป็นสมการ (1) - (3)

#### 4.2 การเชื่อมต่อแบบแยก

ในการเชื่อมต่อแบบแยกจะพิจารณาผลของ Headline blocking ซึ่งจะทำให้ Flow ลื่นสุดลงเมื่อ เซลล์ปลายทางเซลล์ใดเซลล์หนึ่งไม่สามารถรับยานพาหนะได้อีกแล้ว ดังนั้นจะต้องหาก่อนว่าเซลล์ ปลายทางเซลล์ใดจะถึงสถานะที่ไม่สามารถรับยานพาหนะก่อนโดยพิจารณาจากค่า  $\frac{\tilde{R}_i}{\beta_i}$  ถ้าเซลล์ปลายทาง ใดมีค่า  $\frac{\tilde{R}_i}{\beta_i}$  น้อยที่สุดจะพิจารณาเซลล์ปลายทางนั้นเป็นเซลล์ขอบเขตค่าต่ำสุด จากนั้นจะมาพิจารณา Flow ที่ไหลเข้าเนื่องจาก Head-of-Line Vehicle ก่อนเพราะมีลำดับความสำคัญมากกว่า End-of-Line Vehicle ก่อนอื่นเพื่อความสะดวกจะให้เซลล์ปลายทางที่เป็นขอบเขตค่าต่ำสุดมี cell index  $i = E1$  และเซลล์ ปลายทางอีกเซลล์เป็น  $E2$  ตามลำดับ จากนั้นแยกพิจารณาตามเงื่อนไขเป็น 2 กรณีดังนี้

1. เซลล์ปลายทางรับ Head-of-Line Vehicle ได้ทั้งหมด มีเงื่อนไขดังนี้

$$\beta_1 \sum_{m=1}^M (A_{B,m}(t) + \tilde{V}_m B_{B,m}(t)) = \beta_1 \sum_{m=1}^M [n_{B,m}(t-1) - y_{B+1,m}(t-1) + \tilde{V}_m y_{B,m}(t-1)] \leq \tilde{R}_1(t) \quad (30)$$

จากนั้นจะแบ่งเป็นอีก 2 กรณี

- เซลล์ปลายทางรับ End-of-Line Vehicle ได้ทั้งหมด มีเงื่อนไขดังนี้

$$\beta_1 \sum_{m=1}^M (A_{B,m}(t) + \tilde{V}_m B_{B,m}(t)) = \beta_1 \sum_{m=1}^M [n_{B,m}(t-1) - y_{B+1,m}(t-1) + \tilde{V}_m y_{B,m}(t-1)] \leq \tilde{R}_1(t) \quad (31)$$

จะได้ค่าดังต่อไปนี้

$$y_{E1,m}(t) = \beta_1 (A_{B,m}(t) + \tilde{V}_m B_{B,m}(t)) \quad (32)$$

$$y_{E2,m}(t) = \beta_2 (A_{B,m}(t) + \tilde{V}_m B_{B,m}(t)) \quad (33)$$

$$y_{E1}(t) = \beta_1 \sum_{m=1}^M (A_{B,m}(t) + \tilde{V}_m B_{B,m}(t)) \quad (34)$$

$$y_{E2}(t) = \beta_2 \sum_{m=1}^M (A_{B,m}(t) + \tilde{V}_m B_{B,m}(t)) \quad (35)$$

- เซลล์ปลายทางไม่สามารถรับ End-of-Line Vehicle ได้ทั้งหมด มีเงื่อนไขดังนี้

$$\beta_1 \sum_{m=1}^M (A_{B,m}(t) + \tilde{V}_m B_{B,m}(t)) = \beta_1 \sum_{m=1}^M [n_{B,m}(t-1) - y_{B+1,m}(t-1) + \tilde{V}_m y_{B,m}(t-1)] \geq \tilde{R}_1(t) \quad (36)$$

จะได้ค่าดังต่อไปนี้

$$y_{E1,m}(t) = \beta_1 A_{B,m}(t) + \frac{\tilde{V}_m B_{B,m}(t)(\tilde{R}_1(t) - \beta_1 \sum_{m=1}^M A_{B,m}(t))}{\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{B,m}(t)]} \quad (37)$$

$$y_{E2,m}(t) = \beta_2 A_{B,m}(t) + \frac{\beta_2 \tilde{V}_m B_{B,m}(t)(\tilde{R}_1(t) - \beta_1 \sum_{m=1}^M A_{B,m}(t))}{\beta_1 \sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{B,m}(t)]} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} y_{E1}(t) &= \sum_{m=1}^M \left[ \beta_1 A_{B,m}(t) + \frac{\tilde{V}_m B_{B,m}(t)(\tilde{R}_1(t) - \beta_1 \sum_{m=1}^M A_{B,m}(t))}{\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{B,m}(t)]} \right] \\ &= \tilde{R}_1(t) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} y_{E2}(t) &= \sum_{m=1}^M \left[ \beta_2 A_{B,m}(t) + \frac{\beta_2 \tilde{V}_m B_{B,m}(t)(\tilde{R}_1(t) - \beta_1 \sum_{m=1}^M A_{B,m}(t))}{\beta_1 \sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{B,m}(t)]} \right] \\ &= \frac{\beta_2}{\beta_1} \tilde{R}_1(t) \end{aligned} \quad (40)$$

2. เซลล์ปลายทางไม่สามารถรับ Head-of-Line Vehicle ได้ทั้งหมด มีเงื่อนไขดังนี้

$$\beta_1 \sum_{m=1}^M A_{B,m}(t) = \beta_1 \sum_{m=1}^M [n_{B,m}(t-1) - y_{E1}(t-1) - y_{E2}(t-1)] \geq \tilde{R}_1(t) \quad (41)$$

จะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$y_{E1,m}(t) = \frac{\tilde{V}_m A_{B,m}(t) \tilde{R}_1(t)}{\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m A_{B,m}(t)]} \quad (42)$$

$$y_{E2,m}(t) = \frac{\beta_2 \tilde{V}_m A_{B,m}(t) \tilde{R}_1(t)}{\beta_1 \sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m A_{B,m}(t)]} \quad (43)$$

$$y_{E1}(t) = \tilde{R}_1(t) \quad (44)$$

$$y_{E2}(t) = \frac{\beta_2}{\beta_1} \tilde{R}_1(t) \quad (45)$$



### 4.3 การเชื่อมต่อแบบรวม

ในการเชื่อมต่อแบบรวมจะมีตัวแปรเพิ่มขึ้นมาดังนี้

$y_E(t)$  = Flow รวมทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่เซลล์ปลายทาง  $E$

$y_{E1}(t)$  = Flow ที่ไหลจากเซลล์ต้นทางที่ 1 เข้าสู่เซลล์ปลายทาง  $E$

$y_{E2}(t)$  = Flow ที่ไหลจากเซลล์ต้นทางที่ 2 เข้าสู่เซลล์ปลายทาง  $E$

$S_{H1}(t)$  = ความสามารถในการส่งของเซลล์ต้นทางที่ 1 เนื่องจาก Head-of-Line Vehicle

$S_{H2}(t)$  = ความสามารถในการส่งของเซลล์ต้นทางที่ 2 เนื่องจาก Head-of-Line Vehicle

$S_{D1}(t)$  = ความสามารถในการส่งของเซลล์ต้นทางที่ 1 เนื่องจาก End-of-Line Vehicle

$S_{D2}(t)$  = ความสามารถในการส่งของเซลล์ต้นทางที่ 2 เนื่องจาก End-of-Line Vehicle

จะหาค่าได้ดังต่อไปนี้ดังต่อไปนี้

$$y_E(t) = y_{E1}(t) + y_{E2}(t) \quad (46)$$

$$S_{H1}(t) = \sum_{m=1}^M A_{1,m}(t) = A_1(t) \quad (47)$$

$$S_{H2}(t) = \sum_{m=1}^M A_{2,m}(t) = A_2(t) \quad (48)$$

$$S_{D1}(t) = \sum_{m=1}^M \tilde{V}_m B_{1,m}(t) \quad (49)$$

$$S_{D2}(t) = \sum_{m=1}^M \tilde{V}_m B_{2,m}(t) \quad (50)$$

จากนั้นจะทำการคำนวณค่า Flow ที่ไหลเข้าสู่เซลล์ปลายทางจากเซลล์ต้นทางที่ 1 และ 2 โดยแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีดังต่อไปนี้

1. เซลล์ปลายทางสามารถรับยานพาหนะจากเซลล์ต้นทางได้ทั้งหมด

มีเงื่อนไขดังนี้คือ

$$\tilde{R}_E(t) \geq (S_{H1}(t) + S_{D1}(t)) + (S_{H2}(t) + S_{D2}(t)) \quad (51)$$

จะทำให้ได้ Flow ที่ไหลเข้าสู่เซลล์ปลายทางดังนี้

$$y_E(t) = (S_{H1}(t) + S_{D1}(t)) + (S_{H2}(t) + S_{D2}(t)) \quad (52)$$

โดย

$$y_{E1}(t) = S_{H1}(t) + S_{D1}(t) = A_1(t) + \sum_{m=1}^M \tilde{V}_m B_{1,m}(t) \quad (53)$$

$$y_{E1,m}(t) = A_{1,m}(t) + \tilde{V}_m B_{1,m}(t) \quad (54)$$

$$y_{E2}(t) = S_{H2}(t) + S_{D2}(t) = A_2(t) + \sum_{m=1}^M \tilde{V}_m B_{2,m}(t) \quad (55)$$

$$y_{E2,m}(t) = A_{2,m}(t) + \tilde{V}_m B_{2,m}(t) \quad (56)$$

2. เซลล์ปลายทางไม่สามารถรับยานพาหนะจากเซลล์ต้นทางได้ทั้งหมด มีเงื่อนไขดังนี้คือ

ในการพิจารณากรณีนี้นั้นยานพาหนะจากเซลล์ต้นทางไม่สามารถเข้าสู่เซลล์ปลายทางได้ทั้งหมด ดังนั้นก่อนอื่นต้องทราบอัตราส่วนการรวมตัว  $p$  ก่อนจึงทำการคำนวณต่อไป Flow ที่ไหลเข้าสู่ เซลล์ปลายทางหาค่าได้ดังนี้

$$y_E(t) = \tilde{R}_E \quad (57)$$

$$y_{E1}(t) = p_1 \tilde{R}_E \quad (58)$$

$$y_{E2}(t) = p_2 \tilde{R}_E \quad (59)$$

จากนั้นจะพิจารณาหาค่า Flow ในแต่ละเซลล์ต้นทางเป็น 2 กรณีดังนี้

- ถ้า  $\sum_{m=1}^M A_{i,m}(t) \geq y_{Ei}, i = 1, 2$  จะได้

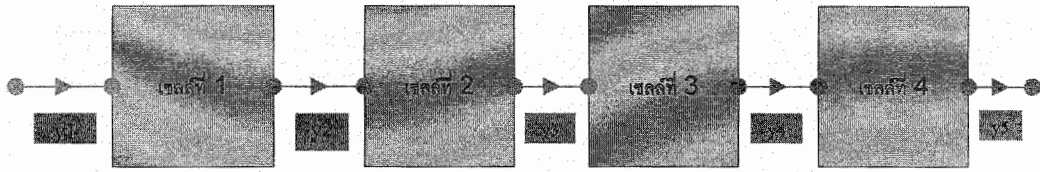
$$y_{Ei,m}(t) = \frac{\tilde{V}_m A_{i,m}(t) p_i \tilde{R}_E(t)}{\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m A_{i,m}(t)]} \quad (60)$$

- ถ้า  $\sum_{m=1}^M A_{i,m}(t) \leq y_{Ei}, i = 1, 2$  จะได้

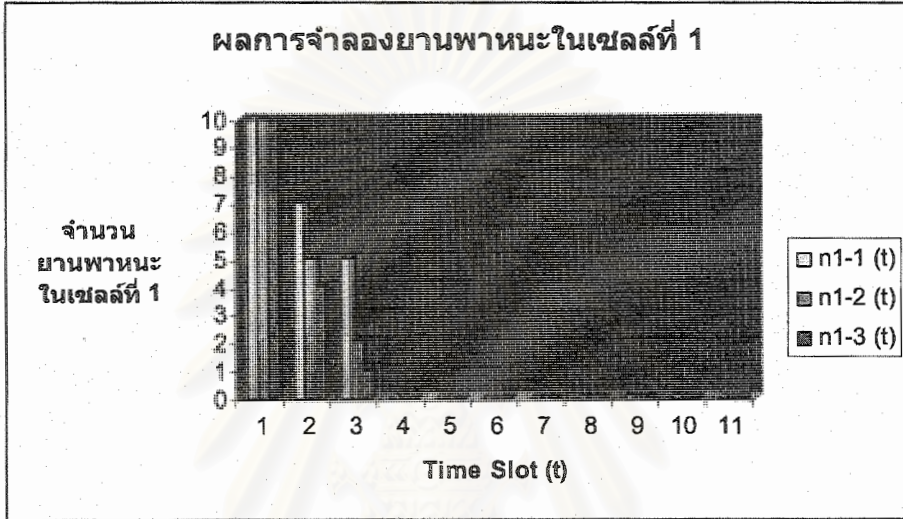
$$y_{Ei,m}(t) = A_{i,m}(t) + \frac{\tilde{V}_m B_{i,m}(t) (p_i \tilde{R}_E - \sum_{m=1}^M A_{i,m}(t))}{\sum_{m=1}^M [\tilde{V}_m B_{i,m}(t)]} \quad (61)$$

## 5. ผลการจำลอง

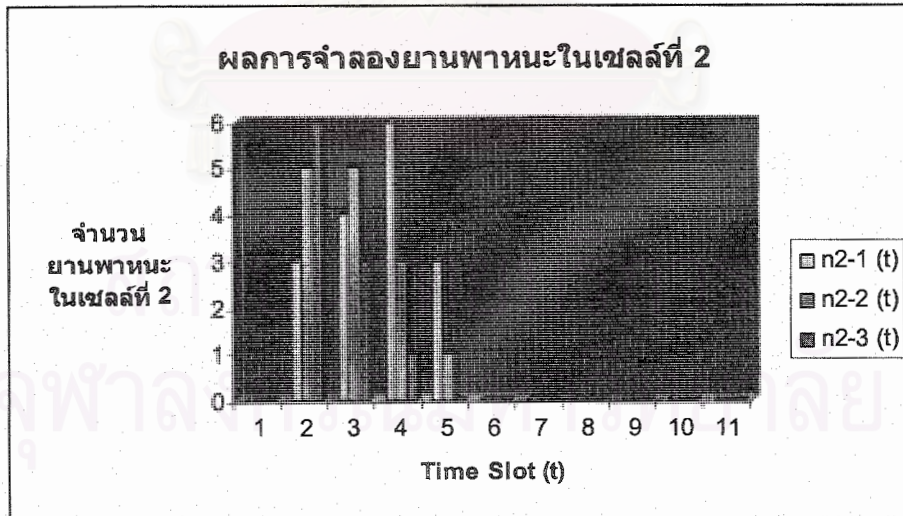
ในการจำลองนี้เรากำหนดให้มีเซลล์ 4 เซลล์เชื่อมต่อแบบปกติเข้าด้วยกัน โดยทุกเซลล์มีความจุเท่ากับ 30,  $\delta_r = 0.8$  และ  $Q_i = 15$  ตามลำดับ จากนั้นเรากำหนดให้มียานพาหนะ 3 ประเภท ( $M = 3$ ) โดยมี  $V_1 = 40$  km/hr,  $V_2 = 60$  km/hr และ  $V_3 = 80$  ดังนั้น  $V_{max} = V_3 = 80$  โดยมี Boundary Flow  $y_j(t) = 0$ ,  $y_3(t) = 0$ , ทุกค่า  $t = 0, 1, \dots, 10$  และมีจำนวนยานพาหนะแต่ละประเภทที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$  ดังนี้  $n_{1,1}(0) = n_{1,2}(0) = n_{1,3}(0) = 10$ ,  $n_2(0) = n_3(0) = n_4(0) = 0$  ได้ผลการจำลองในแต่ละเซลล์ดังนี้



รูปที่ 7 แผนผังการเชื่อมต่อเซลล์ที่ใช้ในการจำลอง

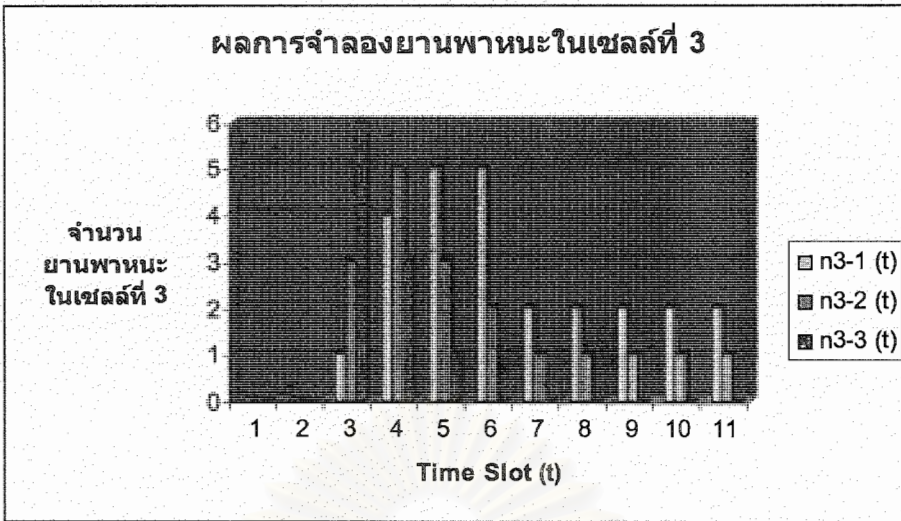


รูปที่ 8 ผลการจำลองในเซลล์ที่ 1

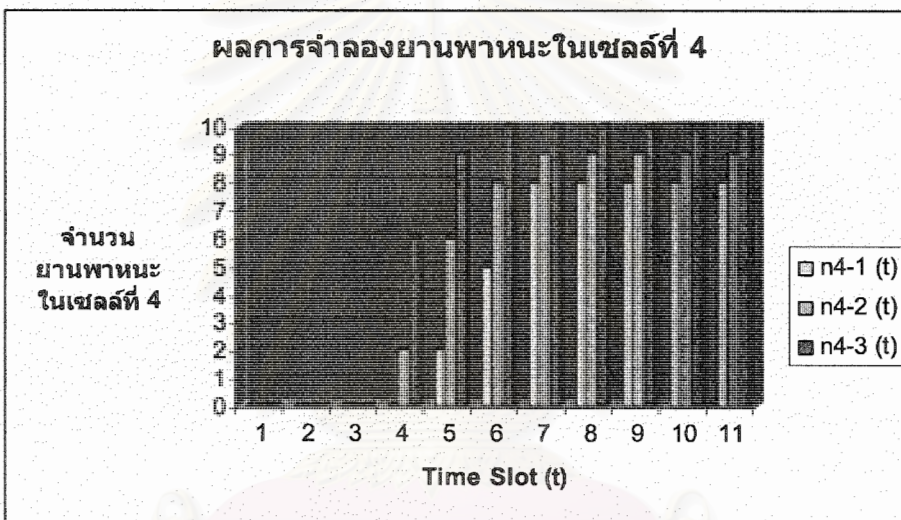


รูปที่ 9 ผลการจำลองในเซลล์ที่ 2





รูปที่ 10 ผลการจำลองในเซลล์ที่ 3



รูปที่ 11 ผลการจำลองในเซลล์ที่ 4

#### สรุปผลการทดลอง

จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่เรานำเสนอสามารถแสดงถึงปรากฏการณ์ Platoon Dispersion ได้ เนื่องจากมีการกระจายตัวของยานพาหนะประเภทต่างๆ เมื่อสภาพการจราจรเบาบาง และจะค่อยๆ ลดการกระจายตัวจนเริ่มกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อนอีกครั้งเมื่อสภาพการจราจรเริ่มติดขัด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แบบจำลองที่ไม่แบ่งแยกประเภทของยานพาหนะไม่สามารถแสดงหรือจำลองได้ แสดงว่าแบบจำลองที่เรานำเสนอพอจะแสดงคุณสมบัติที่แบบจำลองแบบแยกประเภทยานพาหนะควรจะทำได้



## เอกสารอ้างอิง

1. Carlos F. Daganzo, "The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation Of Highway Traffic Consistent With The Hydrodynamic Theory", Transportation Research Part B Vol.28B, No.4, pp. 269-287, 1994
2. Carlos F. Daganzo, "The Cell Transmission Model Part II: Network Traffic", Transportation Research Part B Vol. 29B, No.2, pp. 79-93, 1995
3. Geetam Tiwari, "Traffic Flow and Safety : Need for New Models for Heterogeneous Traffic"  
[web.iitd.ac.in/~tripp/publications/paper/planning/gtftiwoco.PDF](http://web.iitd.ac.in/~tripp/publications/paper/planning/gtftiwoco.PDF)
4. Hong K. Lo, Elbert Chang, Yiu Cho Chan, "Dynamic Network Control", Transportation Research Part A 35 (2001) 721-744
5. Laura , Xiaotian Sun, Roberto Horowitz, Luis Alvarez, "Traffic Density Estimation with Cell Transmission Model", Proceedings of the American Control Conference, v 5, 2003, p 3750-3755
6. Xiaotian Sun, Roberto Horowitz, "A localized Switching Ramp-Metering Controller with a Queue Length Regulator fo Congested Freeways", 2005 American Control Conference, June 8-10, 2005., Portland, OR, USA
7. Xiaotian Sun, Laura Munoz, Roberto Horowitz, "Mixture Kalman Filter Based Highway Congestion Mode and Vehicle Density Estimator and its Application", Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts, June 30 - July 2, 2004
8. Xiaotian Sun, Laura Munoz, Roberto Horowitz, "Highway Traffic State Estimation Using Improved Mixture Kalman Filters for Effective Ramp Metering Control", Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, v 6, 2003, p 6333-6338
9. J. H. Banks, "Introduction to Transportation Engineering", 2nd ed., Singapore: McGraw-Hill, 2002.

10. Serge P. Hoogendoorn, Piet HL Bovy, "Continuum modeling of multiclass traffic flow", *Transportation research, Part B: Methodological*, v 34B, n 2, Feb, 2000, p 123-146
11. Hsun-Jung Cho, Shih-Ching Lo, "Modeling Self-consistent multi-class dynamic traffic flow", *Physica A* 312 (2002) 342-362
12. Lighthill, M.J., Whitham, G.B., "On kinematic waves: II. A theory of traffic flow on long crowded roads", *Proceedings of the Royal Society, London, Series A* 229 (1178), 317-345, 1955
13. Richards, P.J., "Shock waves on the highway", *Operations Research* 4, 42-51, 1956
14. Payne Harold J., "FREFLO: A Macroscopic Simulation Model Of Freeway traffic", *Transportation Research Record*, n 722, 1979, p 68-77
15. Papageorgiou M., Blosseville J.-M., Hadj-Salem H., "Macroscopic modelling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris.", *Transportation Research* 23B (1989), No. 1, pp. 29 - 47.
16. P.G. Michalopoulos, P. Yi, A.S. Lyrintzis, "Continuum modelling of traffic dynamics for congested freeways", *Transportation Research, Part B: Methodological*, v 27, n 4, Aug, 1993, p 315
17. Zhang, H.M., "Theory of nonequilibrium traffic flow", *Transportation Research, Part B: Methodological*, v 32B, n 7, Sep, 1998, p 485-498
18. R.D. Kuhne, Volmuller, R. Hamerslag, "Proceedings of the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory", VNU Science Press, 1984, *Transportation Science*, Vol. 19, No. 3, 1985.
19. B.S. Kerner, P. , "Cluster effect in initially homogeneous traffic flow", *Physical Review E. Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, v 48, n 4, Oct, 1993, p R2335
20. B.S. Kerner, P. , "Structure and parameters of clusters in traffic flow", *Phys. Rev. E* 50, 54-83 (1994)

21. W.F. Phillips, "Kinetic Model for Traffic Flow", Philips, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 1997.
22. Carlos F. Daganzo, "Requiem for Second-Order Fluid Approximations of Traffic Flow", Transportation Research, Part B: Methodological, v 29B, n 4, Aug, 1995, p 277-286
23. A. Aw, M. Rascle, "Resurrection of 'second order' models of traffic flow", SIAM Journal on Applied Mathematics, v 60, n 3, 2000, p 916-938
24. M. Gunther, A. Klar, T. Materne, R. Wegener, "An explicitly solvable kinetic model for vehicular traffic and associated macroscopic equations", Comput. Math. Appl., preprint, Modelling, 35, 591-606, May 22, 2001.
25. G.C.K. Wong, S.C. Wong, "A multi-class flow model – an extension of LWR model with heterogeneous drivers", Transportation Research Part A 36(2002) 827-841
26. Zuojin Zhu, Gang-len Chang, and Tongqiang Wu, "Numerical Analysis of Freeway Traffic Flow Dynamics for Multiclass Drivers", Transportation Research Record 1852, Paper No. 03-2188
27. Hawking, "A Briefer History of Time." ISBN 974 - 323 - 579 - 5 สำนักพิมพ์มติชน
28. "MY MATHS", January 2006, Volume 1, Number 12, สำนักพิมพ์วิภาษา
29. "อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์", แปลและเรียบเรียงจาก "The Story of Albert Einstein by Miss Gillian Freeman", Vallentine, Mitchell & Co. Ltd., London, 1960, ผู้แปล อภรณ์ชาติบุรุษ, ผู้ตรวจ กลิกา สมบัติศิริ, งานแปลของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ อันดับที่ 11
30. "แอลเบิร์ต ไอน์สไตน์", แปลและเรียบเรียงจาก "Albert Einstein by Fiona Macdonald", Exley Publication Ltd., ผู้แปล กีรณา เหลืองศิริ, บรรณาธิการ รศ. เย็นใจ สมวิเชียร, บริษัท นานมีบุ๊คส์ จำกัด