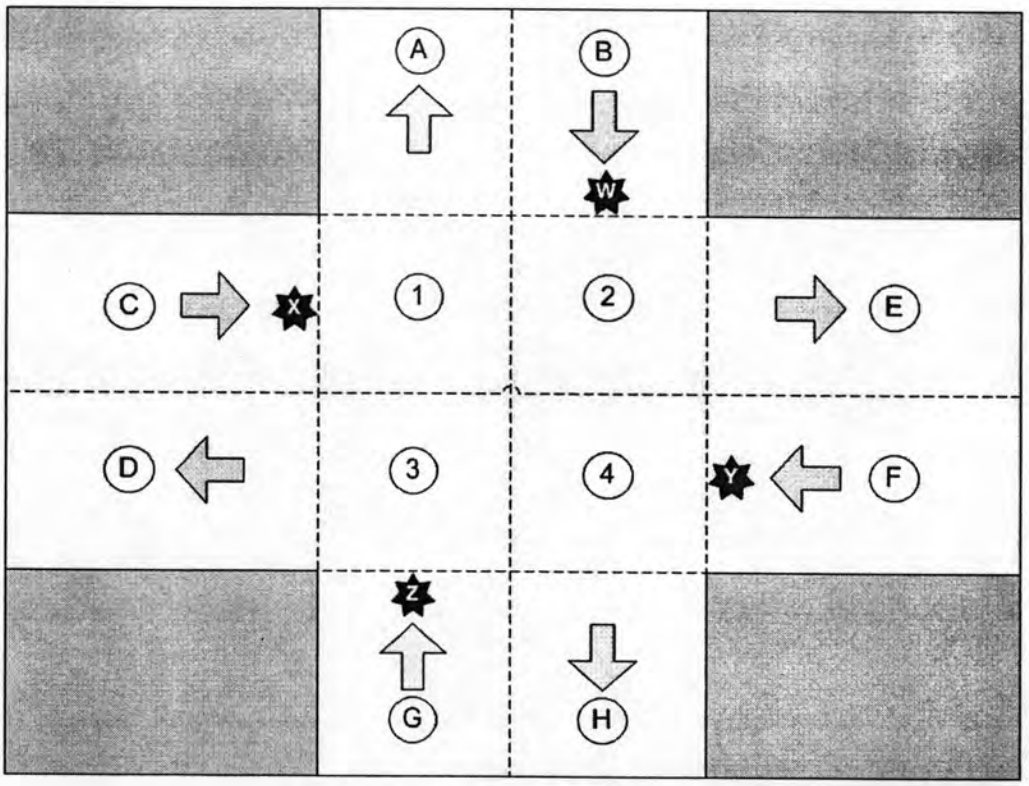
บทที่ 4

กรณีศึกษาการแปลงและตรวจสอบแผนภาพสถานะ

ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร

4.1 ความเป็นมาของระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร

ในเมืองขนาดใหญ่ที่มีการจราจรหนาแน่น การบริหารและจัดการที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งก็คือ การควบคุมสัญญาณไฟจราจร ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของระบบ คือ เพื่อให้ผู้ขับขี่ยานพาหนะในแต่ละทิศทางสามารถเดินทางได้โดยปลอดภัย และการจราจรดำเนินไปด้วยความคล่องแคล่ว



รูปที่ 4.1 แผนภาพสัญญาณไฟจราจร

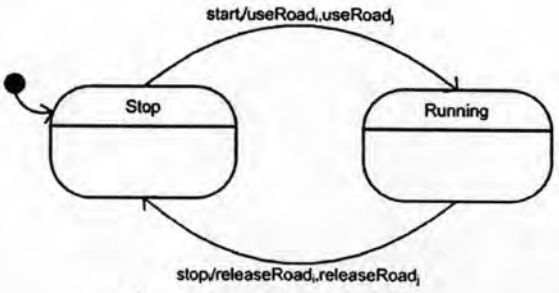
จากรูปที่ 4.1 เป็นแบบจำลองการควบคุมสัญญาณไฟจราจรซึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดให้ถนนมีถนนสองเส้นตัดกัน และแต่ละเส้นมีสองเลนเพื่อให้รถวิ่งสวนทางกันได้ ซึ่งรถแต่ละคันสามารถวิ่งได้ในทางตรงเท่านั้น ไม่สามารถเลี้ยวซ้ายหรือขวาได้

จากการวิเคราะห์ระบบ พบว่ารถที่วิ่งมาจากถนนในแต่ละทิศทางจะวิ่งผ่านพื้นที่ตัดกันตรงกลาง เช่น หากรถจากตำแหน่ง C ต้องการเดินทางไปยังตำแหน่ง E จะต้องวิ่งผ่านพื้นที่ 1 และ 2 หรือ หากรถจากตำแหน่ง G ต้องการเดินทางไปยังตำแหน่ง A จะต้องวิ่งผ่านพื้นที่ 3 และ 1 เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการวิ่งของรถในแต่ละทิศทางจะมีการใช้งานพื้นที่ตรงกลางร่วมกัน เช่น รถที่วิ่งจาก C ไป E จะใช้พื้นที่ 1 ร่วมกับรถที่วิ่งจาก G ไป A เป็นต้น ซึ่งหากมีการปล่อยให้รถที่ใช้พื้นที่กลางร่วมกันวิ่งพร้อมกันก็จะทำให้เกิดการชนกันได้ ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรเพื่อควบคุมการวิ่งของรถในแต่ละทิศทาง เพื่อระบุช่วงเวลาที่วิ่งได้และช่วงเวลาที่ต้องหยุดรอ เช่น หากสัญญาณไฟ X เป็นเขียวแล้ว สัญญาณไฟ Z จะต้องเป็นแดง และเป็นเขียวพร้อมกันไม่ได้ เป็นต้น

หากพิจารณาระบบในอีกมุมมองหนึ่งจะพบว่าระบบมีความคล้ายคลึงกับ ระบบของผู้บริโภคและทรัพยากรที่จำกัด คือ ในระบบหนึ่งๆ จะประกอบด้วยผู้บริโภคจำนวนหนึ่งและทรัพยากรอีกจำนวนหนึ่ง ซึ่งในระยะเวลาหนึ่งๆ หากทรัพยากรถูกใช้งานโดยผู้บริโภคใดแล้ว ผู้บริโภคอื่นๆ จะไม่สามารถใช้งานทรัพยากรนั้นได้ ต้องรอให้ผู้บริโภคหยุดใช้งานทรัพยากรก่อน ซึ่งหากเปรียบเทียบกับระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร จะเปรียบถนนเป็นทรัพยากร และรถยนต์เป็นผู้บริโภค โดยมีสัญญาณไฟจราจรเป็นตัวสั่งงานว่าเมื่อใดรถยนต์จะใช้งานถนนได้

ในมุมมองของระบบเชิงวัตถุ จะประกอบด้วยสามวัตถุ คือ รถ ถนน และสัญญาณไฟจราจร ซึ่งเราสามารถเขียนบรรยายด้วยแผนภาพสถานะยูเอ็มแอลตามข้อกำหนดของระบบที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้นได้ดังนี้

4.1.1 แผนภาพสถานะของรถ (Car)

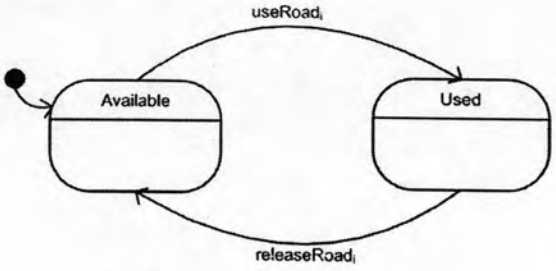


รูปที่ 4.2 แผนภาพสถานะของรถ

จากรูปที่ 4.2 เป็นแผนภาพแสดงสถานะของรถที่วิ่งในแต่ละเส้นทาง ซึ่งมีสถานะอยู่ 2 สถานะ คือ *Stop* สำหรับสถานะที่รถในเส้นทางนั้นหยุดวิ่ง และ *Running* สำหรับสถานะที่รถในเส้นทางนั้นวิ่ง ในตอนเริ่มต้นระบบนั้นรถจะอยู่ในสถานะ *Stop* จนกระทั่งมีสัญญาณ *start* จากไฟจราจรให้รถเริ่มวิ่งได้ และเมื่อรถเริ่มวิ่งก็จะส่งสัญญาณการใช้ถนน *useRoad* ไปยังถนนที่รถ

ต้องใช้ในการวิ่ง จากนั้นรถจะเปลี่ยนสถานะไปสู่ *Running* และในแนวทางเดียวกันรถจะสามารถเปลี่ยนสถานะกลับไปเป็น *Stop* เมื่อได้รับสัญญาณ *stop* จากไฟจราจร และเมื่อรถหยุดวิ่งก็จะส่งสัญญาณเลิกใช้ถนน *releaseRoad* ไปยังถนนที่ตัวรถใช้งานอยู่ เพื่อให้รถในเส้นทางอื่นๆ สามารถใช้งานถนนดังกล่าวได้

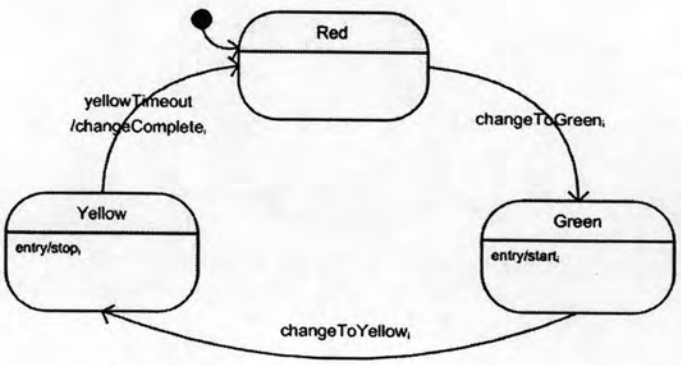
4.1.2 แผนภาพสถานะของถนน (Road)



รูปที่ 4.3 แผนภาพสถานะของถนน

จากรูปที่ 4.3 เป็นแผนภาพสถานะของถนนส่วนกลางที่เป็นทางแยก โดยมีสถานะทั้งหมด 2 สถานะ คือ *Available* แสดงสถานะที่ถนนว่างไม่มีรถวิ่งผ่าน และ *Used* แสดงสถานะที่ถนนไม่ว่างเนื่องจากมีรถวิ่งผ่าน โดยตอนเริ่มต้นระบบนั้นถนนจะอยู่ที่สถานะ *Available* ซึ่งถนนจะเปลี่ยนสถานะจาก *Available* ไปเป็น *Used* หากได้รับสัญญาณขอใช้ถนน *useRoad* จากรถ และในทำนองเดียวกันถนนสามารถเปลี่ยนสถานะจาก *Used* ไปเป็น *Available* เมื่อได้รับสัญญาณเลิกใช้ถนน *releaseRoad* จากตัวรถ

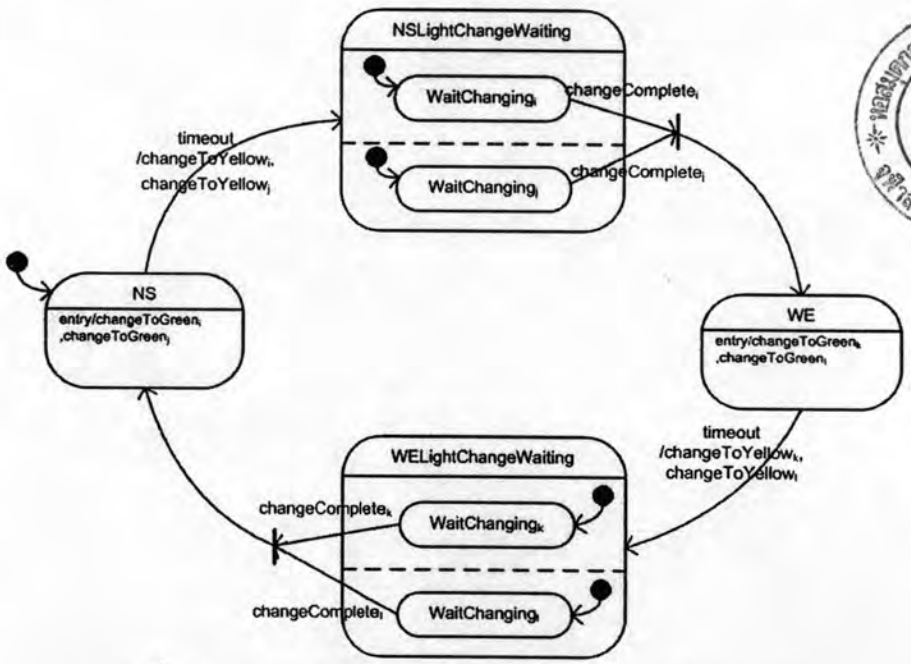
4.1.3 แผนภาพสถานะของสัญญาณไฟจราจร (Traffic Light)



รูปที่ 4.4 แผนภาพสถานะของสัญญาณไฟจราจร

จากรูปที่ 4.4 เป็นแผนภาพสถานะของสัญญาณไฟจราจร โดยสัญญาณไฟจราจรจะมีสถานะหลักสามสถานะ คือ *Red* สำหรับสัญญาณไฟแดง *Green* สำหรับสัญญาณไฟเขียว และ *Yellow* สำหรับสัญญาณไฟเหลือง โดยเริ่มต้นระบบสัญญาณไฟจะอยู่ที่สถานะ *Red* ซึ่งสัญญาณไฟจะเปลี่ยนสถานะจาก *Red* ไปเป็น *Green* เมื่อได้รับสัญญาณ *changeToGreen* จากตัวควบคุม และในขณะที่เปลี่ยนเป็นไฟเขียวก็จะมีการส่งสัญญาณ *start* ไปยังรถในเส้นทางที่สัญญาณไฟจราจรควบคุมอยู่ให้เริ่มวิ่งได้ และเมื่อระบบได้รับสัญญาณ *changeToYellow* จากตัวควบคุม สัญญาณไฟจะเปลี่ยนไปเป็นไฟเหลือง และส่งสัญญาณ *stop* ไปยังรถในเส้นทางที่สัญญาณไฟจราจรควบคุมอยู่ให้หยุดวิ่ง จากนั้นเมื่อหมดเวลาไฟเหลือง คือ ระบบได้รับสัญญาณ *yellowTimeout* จะทำให้สัญญาณไฟจะเปลี่ยนสถานะกลับไปเป็นแดง พร้อมทั้งส่งสัญญาณ *changeComplete* กลับไปแจ้งให้ตัวควบคุมทราบ

4.1.4 แผนภาพสถานะของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Controller)

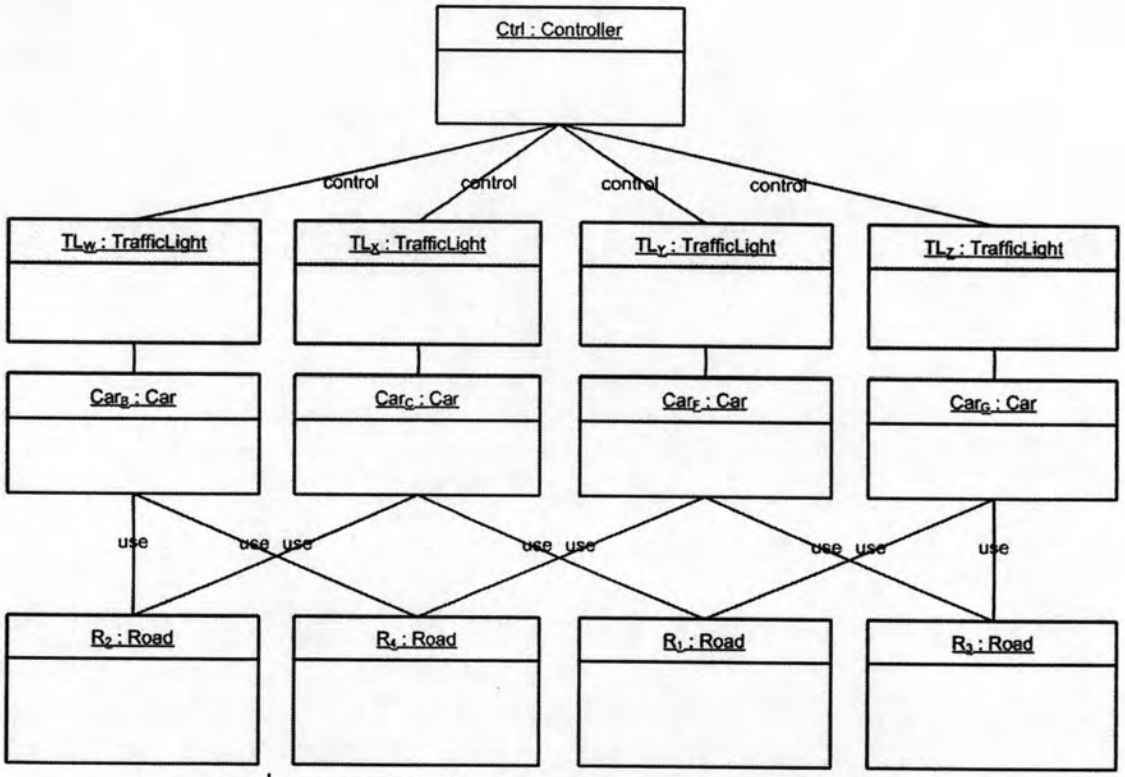


รูปที่ 4.5 แผนภาพสถานะของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร

จากรูปที่ 4.5 เป็นแผนภาพสถานะของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร ซึ่งในตอนเริ่มต้นระบบจะอยู่ที่สถานะ *NS* ซึ่งจะควบคุมสัญญาณไฟให้รถที่วิ่งในทิศทางตะวันออกไปตะวันตกหรือตะวันตกไปตะวันออกวิ่งได้เท่านั้น หากถึงเวลาที่กำหนดตัวควบคุมจะทำการส่งสัญญาณเปลี่ยนไฟ *changeToYellow* ไปยังรถในเส้นทางตะวันออกตะวันตก เพื่อให้เปลี่ยนสัญญาณไฟ จากนั้นจึงรอสัญญาณตอบกลับว่าเปลี่ยนแปลงเรียบร้อยแล้ว จึงเปลี่ยนสถานะตัวควบคุมไปอยู่ที่สถานะ

WE และส่งสัญญาณ *changeToGreen* ไปยังรถในเส้นทางเหนือใต้ ในแนวทางเดียวกันเมื่อถึงเวลาที่กำหนดตัวควบคุมจะทำการส่งสัญญาณเปลี่ยนไฟ *changeToYellow* ไปยังรถในเส้นทางเหนือใต้ และเปลี่ยนสถานะกลับไปเป็น *NS* พร้อมทั้งส่งสัญญาณ *changeToGreen* ไปยังรถในเส้นทางตะวันออกตะวันตก

แผนภาพสถานะทั้งหมดที่ได้นำเสนอข้างต้นแสดงพฤติกรรมต่างๆ ของวัตถุแต่ละชนิด หากพิจารณาจากรูปที่ 4.1 นั้น ระบบจะประกอบด้วยวัตถุ คือ ถนนสี่พื้นที่, รถสี่เส้นทาง, ไฟจราจรสี่สัญญาณ และตัวควบคุมสัญญาณหนึ่งตัว ทำงานร่วมกัน ซึ่งเราสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของวัตถุแต่ละวัตถุโดยใช้แผนภาพวัตถุยูเอ็มแอลดังรูปที่ 4.6



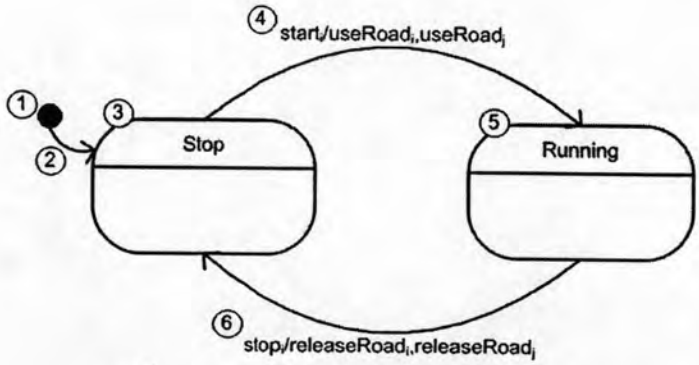
รูปที่ 4.6 แผนภาพวัตถุของระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร

4.2 การแปลงแผนภาพสถานะไปเป็นไพแคลคูลัส

ในหัวข้อนี้เราจะทำการแปลงแผนภาพสถานะยูเอ็มแอลของระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.1 โดยภาษาที่ได้เลือกมาเป็นภาษาปลายทางในกรณีศึกษานี้ คือ ไพแคลคูลัส เนื่องจากแผนภาพสถานะที่ถูกออกแบบมีความซับซ้อนในส่วนของเส้นการเปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อกับสถานะย่อยภายในสถานะประกอบ ซึ่งในการแปลงเป็นซีอาร์อีไม่ได้ครอบคลุมการแปลงในส่วนนี้ แต่อย่างไรก็ตามหากแผนภาพสถานะถูกออกแบบและอยู่ในรูปลักษณะที่กฎการแปลงที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ครอบคลุมทั้งหมดก็จะสามารถแปลงและตรวจสอบความต้องกันของระบบได้ด้วยขั้นตอนเดียวกัน

ในการแปลงแผนภาพสถานะนี้เราจะตัดบางส่วนในนิพจน์ที่ไม่ต้องการทิ้งไปเนื่องจากในแผนภาพไม่ได้ระบุพฤติกรรมนั้นๆ ไว้ เช่น ในกรณีที่สถานะไม่มีการกระทำตอบสนองต่อเหตุการณ์เปลี่ยนเข้าสู่สถานะหรือออกจากสถานะก็จะตัดนิพจน์ส่วนนั้นทิ้ง หรือแผนภาพไม่ได้อยู่ภายใต้สถานะประกอบก็จะละนิพจน์ที่สนับสนุนการอธิบายพฤติกรรมของสถานะประกอบออก หรือนิพจน์ที่สนับสนุนสถานะประวัติ เป็นต้น

4.2.1 การแปลงแผนภาพสถานะของรถ



รูปที่ 4.7 การแปลงแผนภาพสถานะของรถ

จากแผนภาพสถานะของรถในรูปที่ 4.7 เราทำการแปลงโดยใช้สัญลักษณ์ Car_{ij} แทนรถที่วิ่งโดยใช้พื้นที่ส่วนกลาง i และ j ซึ่งเราสามารถแปลงองค์ประกอบย่อยต่างๆ ภายในแผนภาพได้ดังนี้

1) สถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อ 5) ในส่วนของสถานะเริ่มต้น

$$I_{Car_{ij}} = entry_{1_{Car_{ij}}} \cdot \overline{activeT_{1_{Car_{ij}}}} \cdot I'_{Car_{ij}}$$

$$I'_{Car_{ij}} = exit_{Car_{ij}} \cdot \overline{exitComplete_{Car_{ij}}} \cdot I_{Car_{ij}}$$

2) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง

$$T_{I_{Car_{ij}}} = activeT_{I_{Car_{ij}}} \cdot T'_{I_{Car_{ij}}}$$

$$T'_{I_{Car_{ij}}} = \overline{exit_{Car_{ij}}} \cdot exitComplete_{Car_{ij}} \cdot \overline{entry_{Stop_{car_{ij}}}} \cdot T_{I_{Car_{ij}}}$$

3) สถานะ *Stop* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$Stop_{Car_{ij}} = entry_{Stop_{Car_{ij}}} \cdot \overline{activeT_{Stop_{Car_{ij}}}} \cdot Stop'_{Car_{ij}}$$

$$Stop'_{Car_{ij}} = exit_{Car_{ij}} \cdot \overline{exitComplete_{Car_{ij}}} \cdot Stop_{Car_{ij}}$$

4) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *Stop* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{Stop_{Car_{ij}}} = activeT_{Stop_{Car_{ij}}} \cdot T'_{Stop_{Car_{ij}}}$$

$$T'_{Stop_{Car_{ij}}} = start_{Car_{ij}} \cdot \overline{useRoad_{R_i}} \cdot \overline{useRoad_{R_j}} \cdot \overline{exit_{Car_{ij}}} \cdot exitComplete_{Car_{ij}} \cdot \overline{entry_{Running_{Car_{ij}}}} \cdot T_{Stop_{Car_{ij}}}$$

5) สถานะ *Running* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$Running_{Car_{ij}} = entry_{Running_{Car_{ij}}} \cdot \overline{activeT_{Running_{Car_{ij}}}} \cdot Running'_{Car_{ij}}$$

$$Running'_{Car_{ij}} = exit_{Car_{ij}} \cdot \overline{exitComplete_{Car_{ij}}} \cdot Running_{Car_{ij}}$$

6) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *Running* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

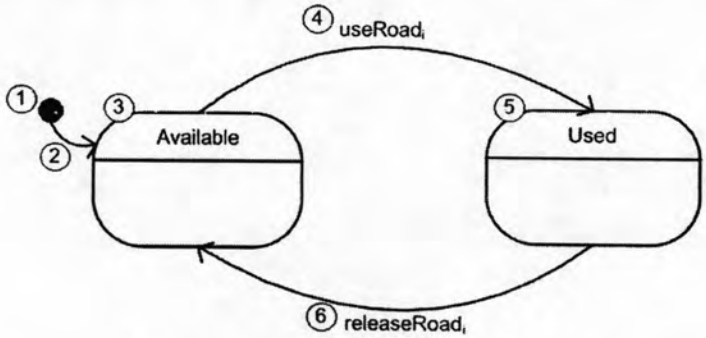
$$T_{Running_{Car_{ij}}} = activeT_{Running_{Car_{ij}}} \cdot T'_{Running_{Car_{ij}}}$$

$$T'_{Running_{Car_{ij}}} = stop_{Car_{ij}} \cdot \overline{releaseRoad_{R_i}} \cdot \overline{releaseRoad_{R_j}} \cdot \overline{exit_{Car_{ij}}} \cdot \overline{entry_{Stop_{Car_{ij}}}} \cdot T_{Running_{Car_{ij}}}$$

จากองค์ประกอบย่อยทั้งหมด เราสามารถอธิบายพฤติกรรมของรถได้ด้วยการอธิบายการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบทั้งหมดโดยใช้ตัวดำเนินการทำงานพร้อมกัน และซ่อนการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ภายในด้วยกันเองด้วยตัวดำเนินการสร้างช่องใหม่ ได้ด้วยนิพจน์ดังนี้

$$Car_{ij} = (new\, activeT_{I_{Car_{ij}}}, exit_{Car_{ij}}, exitComplete_{Car_{ij}}, entry_{Stop_{Car_{ij}}}, activeT_{Stop_{Car_{ij}}}, entry_{Running_{Car_{ij}}}, activeT_{Running_{Car_{ij}}})$$
$$(I_{Car_{ij}} \mid T_{I_{Car_{ij}}} \mid Stop_{Car_{ij}} \mid T_{Stop_{Car_{ij}}} \mid Running_{Car_{ij}} \mid T_{Running_{Car_{ij}}})$$

4.2.2 การแปลงแผนภาพสถานะของถนน



รูปที่ 4.8 การแปลงแผนภาพสถานะของถนน

จากแผนภาพสถานะของถนนในรูปที่ 4.8 เราทำการแปลงโดยใช้สัญลักษณ์ R_i แทนพื้นที่ส่วนกลาง i ซึ่งเราสามารถแปลงองค์ประกอบย่อยต่างๆ ภายในแผนภาพได้ดังนี้

1) สถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อ 5) ในส่วนของสถานะเริ่มต้น จะได้นิพจน์ดังนี้

$$I_{R_i} = entry_{I_{R_i}} \cdot \overline{activeT_{I_{R_i}}} \cdot I'_{R_i}$$
$$I'_{R_i} = exit_{R_i} \cdot \overline{exitComplete_{R_i}} \cdot I_{R_i}$$

2) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{I_{R_i}} = activeT_{I_{R_i}} \cdot T'_{I_{R_i}}$$
$$T'_{I_{R_i}} = \overline{exit_{R_i}} \cdot exitComplete_{R_i} \cdot \overline{entry_{Available_{R_i}}} \cdot T_{I_{R_i}}$$

3) สถานะ *Available* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$Available_{R_i} = entry_{Available_{R_i}} \cdot \overline{activeT_{Available_{R_i}}} \cdot Available'_{R_i}$$

$$Available'_{R_i} = exit_{R_i} \cdot \overline{exitComplete_{R_i}} \cdot Available_{R_i}$$

4) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *Available* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{Available_{R_i}} = activeT_{Available_{R_i}} \cdot T'_{Available_{R_i}}$$

$$T'_{Available_{R_i}} = useRoad_{R_i} \cdot \overline{exit_{R_i}} \cdot exitComplete_{R_i} \cdot \overline{entry_{Used_{R_i}}} \cdot T_{Available_{R_i}}$$

5) สถานะ *Used* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$Used_{R_i} = entry_{Used_{R_i}} \cdot \overline{activeT_{Used_{R_i}}} \cdot Used'_{R_i}$$

$$Used'_{R_i} = exit_{R_i} \cdot \overline{exitComplete_{R_i}} \cdot Used_{R_i}$$

6) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *Used* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

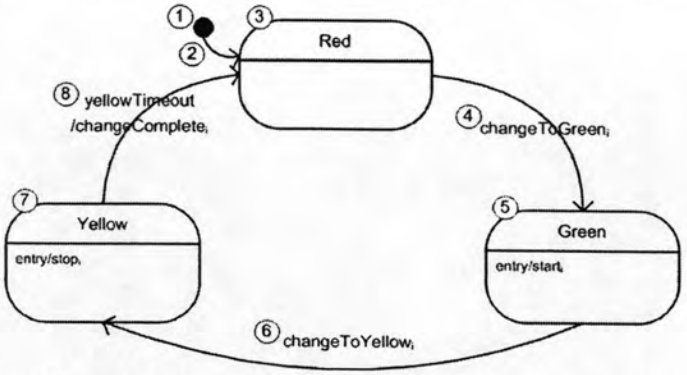
$$T_{Used_{R_i}} = activeT_{Used_{R_i}} \cdot T'_{Used_{R_i}}$$

$$T'_{Used_{R_i}} = releaseRoad_{R_i} \cdot \overline{exit_{R_i}} \cdot \overline{entry_{Available_{R_i}}} \cdot T_{Used_{R_i}}$$

จากองค์ประกอบย่อยทั้งหมด เราสามารถอธิบายพฤติกรรมของถนนได้ด้วยการอธิบายการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบทั้งหมดโดยใช้ตัวดำเนินการทำงานพร้อมกัน และซ่อนการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ภายในด้วยกันเองด้วยตัวดำเนินการสร้างช่องใหม่ ได้ด้วยนิพจน์ดังนี้

$$\begin{aligned} R_i = (&new\,activeT_{I_{R_i}}, exit_{R_i}, exitComplete_{R_i} \cdot entry_{Available_{R_i}}, activeT_{Available_{R_i}} \\ &, entry_{Used_{R_i}}, activeT_{Used_{R_i}}) \\ &(I_{R_i} \mid T_{I_{R_i}} \mid Available_{R_i} \mid T_{Available_{R_i}} \mid Used_{R_i} \mid T_{Used_{R_i}}) \end{aligned}$$

4.2.3 การแปลงแผนภาพสถานะของสัญญาณไฟจราจร



รูปที่ 4.9 การแปลงแผนภาพสถานะของสัญญาณไฟจราจร

จากแผนภาพสถานะของรถในรูปที่ 4.9 เราทำการแปลงโดยใช้สัญลักษณ์ TL_{ij} แทนไฟจราจรที่ควบคุมรถที่จะวิ่งผ่านพื้นที่ส่วนกลาง i และ j ซึ่งเราสามารถแปลงองค์ประกอบย่อยต่างๆ ภายในแผนภาพได้ดังนี้

1) สถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อ 5) ในส่วนของสถานะเริ่มต้น จะได้นิพจน์ดังนี้

$$I_{TL_{ij}} = entry_{I_{TL_{ij}}} \cdot \overline{activeT_{I_{TL_{ij}}}} \cdot I'_{TL_{ij}}$$

$$I'_{TL_{ij}} = exit_{TL_{ij}} \cdot \overline{exitComplete_{TL_{ij}}} \cdot I_{TL_{ij}}$$

2) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้ซักฎข้อ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{I_{TL_{ij}}} = activeT_{I_{TL_{ij}}} \cdot T'_{I_{TL_{ij}}}$$

$$T'_{I_{TL_{ij}}} = \overline{exit_{TL_{ij}}} \cdot exitComplete_{Tl_{ij}} \cdot \overline{entry_{Red_{TL_{ij}}}} \cdot T_{I_{TL_{ij}}}$$

3) สถานะ *Red* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$Red_{TL_{ij}} = entry_{Red_{TL_{ij}}} \cdot \overline{activeT_{Red_{TL_{ij}}}} \cdot Red'_{TL_{ij}}$$

$$Red'_{TL_{ij}} = exit_{TL_{ij}} \cdot \overline{exitComplete_{TL_{ij}}} \cdot Red_{TL_{ij}}$$

4) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *Red* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{Red_{TL_{ij}}} = activeT_{Red_{TL_{ij}}} \cdot T'_{Red_{TL_{ij}}}$$

$$T'_{Red_{TL_{ij}}} = changeToGreen_{TL_{ij}} \cdot \overline{exit_{TL_{ij}}} \cdot exitComplete_{TL_{ij}} \cdot \overline{entry_{Green_{TL_{ij}}}} \cdot T_{Red_{TL_{ij}}}$$

5) สถานะ *Green* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$Green_{TL_{ij}} = entry_{Green_{TL_{ij}}} \cdot \overline{start_{Car_{ij}}} \cdot \overline{activeT_{Green_{TL_{ij}}}} \cdot Green'_{TL_{ij}}$$

$$Green'_{TL_{ij}} = exit_{TL_{ij}} \cdot \overline{exitComplete_{TL_{ij}}} \cdot Green_{TL_{ij}}$$

6) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *Green* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{Green_{TL_{ij}}} = activeT_{Green_{TL_{ij}}} \cdot T'_{Green_{TL_{ij}}}$$

$$T'_{Green_{TL_{ij}}} = changeToYellow_{TL_{ij}} \cdot \overline{exit_{TL_{ij}}} \cdot exitComplete_{TL_{ij}} \cdot \overline{entry_{Yellow_{TL_{ij}}}} \cdot T_{Green_{TL_{ij}}}$$

7) สถานะ *Yellow* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$Yellow_{TL_{ij}} = entry_{Yellow_{TL_{ij}}} \cdot \overline{stop_{Car_{ij}}} \cdot \overline{activeT_{Yellow_{TL_{ij}}}} \cdot Yellow'_{TL_{ij}}$$

$$Yellow'_{TL_{ij}} = exit_{TL_{ij}} \cdot Yellow_{TL_{ij}}$$

8) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *Yellow* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

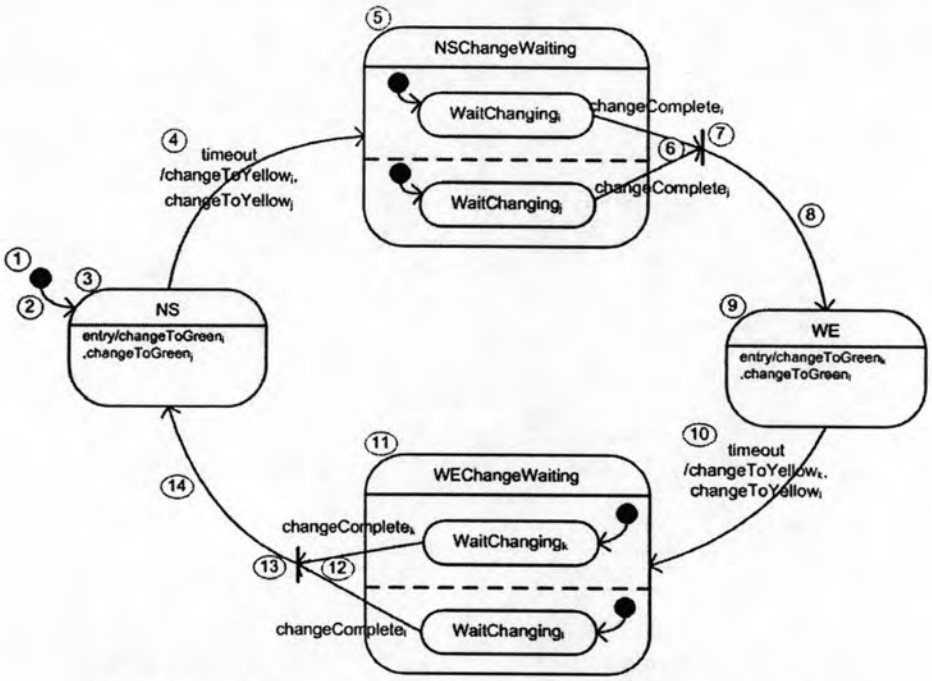
$$T_{Yellow_{TL_{ij}}} = activeT_{Yellow_{TL_{ij}}} \cdot T'_{Yellow_{TL_{ij}}}$$

$$T'_{Yellow_{TL_{ij}}} = yellowTimeout_{TL_{ij}} \cdot \overline{changComplete_{TL_{ij}}} \cdot \overline{exit_{TL_{ij}}} \cdot \overline{entry_{Red_{TL_{ij}}}} \cdot T_{Yellow_{TL_{ij}}}$$

จากองค์ประกอบย่อยทั้งหมด เราสามารถอธิบายพฤติกรรมของรถได้ด้วยการอธิบายการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบทั้งหมดโดยใช้ตัวดำเนินการทำงานพร้อมกัน และซ่อนการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ภายในด้วยกันเองด้วยตัวดำเนินการสร้างช่องใหม่ ได้ด้วยนิพจน์ดังนี้

$$TL_{ij} = (new\ activeT_{I_{TL_{ij}}}, exit_{TL_{ij}}, exitComplete_{TL_{ij}}, entry_{Red_{TL_{ij}}} \cdot activeT_{Red_{TL_{ij}}}$$
$$entry_{Green_{TL_{ij}}}, activeT_{Green_{TL_{ij}}}, entry_{Yellow_{TL_{ij}}}, activeT_{Yellow_{TL_{ij}}})$$
$$(I_{TL_{ij}} \mid T_{I_{TL_{ij}}} \mid Red_{TL_{ij}} \mid T_{Red_{TL_{ij}}} \mid Green_{TL_{ij}} \mid T_{Green_{TL_{ij}}} \mid Yellow_{TL_{ij}} \mid T_{Yellow_{TL_{ij}}})$$

4.2.4 การแปลงแผนภาพตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร



รูปที่ 4.10 การแปลงแผนภาพสถานะของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร

จากแผนภาพสถานะของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรในรูปที่ 4.10 เราทำการแปลงโดยใช้สัญลักษณ์ $Ctrl_{ijkl}$ แทนตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรซึ่งควบคุมสัญญาณไฟที่ควบคุมรถที่วิ่งผ่านพื้นที่ส่วนกลาง i j k และ l ซึ่งเราสามารถแปลงองค์ประกอบย่อยต่างๆ ภายในแผนภาพได้ดังนี้

1) สถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อ 5) ในส่วนของสถานะเริ่มต้น จะได้นิพจน์ดังนี้

$$I_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{I_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{I_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot I'_{Ctrl_{ijkl}}$$

$$I'_{Ctrl_{ijkl}} = exit_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot I_{Ctrl_{ijkl}}$$

2) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้น สามารถแปลงโดยใช้ชักฎข้อ 2) ของการแปลงเส้นการเปลี่ยนแปลง จะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{I_{Ctrl_{ijkl}}} = activeT_{I_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot T'_{I_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$T'_{I_{Ctrl_{ijkl}}} = \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{I_{Ctrl_{ijkl}}}$$

3) สถานะ *NS* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$NS_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{changeToGreen_{TL_{ij}}} \cdot \overline{changeToGreen_{TL_{lk}}} \cdot \overline{activeT_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot NS'_{Ctrl_{ijkl}}$$

$$NS'_{Ctrl_{ijkl}} = exit_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot NS_{Ctrl_{ijkl}}$$

4) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *NS* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงรูปแบบเส้นการเปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อไปยังสถานะประกอบจะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = activeT_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot T'_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$\begin{aligned} T'_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = {} & timeout_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{ij}}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{kl}}} \\ & \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \\ & \cdot (\overline{entry_{I_{ij_{NS}}}} \mid \overline{entry_{I_{lk_{NS}}}}) \cdot T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \end{aligned}$$

5) สถานะประกอบ *NSChangeWaiting* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงสถานะประกอบ จะได้นิพจน์ดังนี้

$$\begin{aligned} NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} = {} & entry_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \\ & \cdot (NSChangeWaiting' \mid R1_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \mid R2_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}) \end{aligned}$$

$$NSChangeWaiting'_{Ctrl_{ijkl}} = exit_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} R1_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = {} & (new\ activeT_{I_{ij_{NS}}}, exit_{ij_{NS}}, exitComplete_{ij_{NS}}, entry_{WaitChanging_{ij_{NS}}}) \\ & (I_{ij_{NS}} \mid T_{I_{ij_{NS}}} \mid WaitChanging_{ij_{NS}}) \end{aligned}$$

$$I_{ij_{NS}} = entry_{I_{ij_{NS}}} \cdot \overline{activeT_{I_{ij_{NS}}}} \cdot I'_{ij_{NS}}$$

$$I'_{ij_{NS}} = exit_{ij_{NS}} \cdot \overline{exitComplete_{ij_{NS}}} \cdot I_{ij_{NS}}$$

$$T_{I_{ij_{NS}}} = activeT_{I_{ij_{NS}}} \cdot T'_{I_{ij_{NS}}}$$

$$T'_{I_{ij_{NS}}} = \overline{exit_{ij_{NS}}} \cdot exitComplete_{ij_{NS}} \cdot \overline{entry_{WaitChanging_{ij_{NS}}}} \cdot T_{I_{ij_{NS}}}$$

$$WaitChanging_{ij_{NS}} = entry_{WaitChanging_{ij_{NS}}} \cdot \overline{activeT_{WaitChanging_{ij_{NS}}}} \cdot WaitChanging'_{ij_{NS}}$$

$$WaitChanging'_{ij_{NS}} = exit_{ij_{NS}} \cdot \overline{exitComplete_{ij_{NS}}} \cdot WaitChanging_{ij_{NS}}$$

$$R2_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = (new\ activeT_{I_{lk_{NS}}}, exit_{lk_{NS}}, exitComplete_{lk_{NS}}, entry_{WaitChanging_{lk_{NS}}})$$
$$(I_{lk_{NS}} | T_{I_{lk_{NS}}} | WaitChanging_{lk_{NS}})$$

$$I_{lk_{NS}} = entry_{I_{lk_{NS}}} \cdot \overline{activeT_{I_{lk_{NS}}}} \cdot I'_{lk_{NS}}$$

$$I'_{lk_{NS}} = exit_{lk_{NS}} \cdot \overline{exitComplete_{lk_{NS}}} \cdot I_{lk_{NS}}$$

$$T_{I_{lk_{NS}}} = activeT_{I_{lk_{NS}}} \cdot T'_{I_{lk_{NS}}}$$

$$T'_{I_{lk_{NS}}} = \overline{exit_{lk_{NS}}} \cdot exitComplete_{lk_{NS}} \cdot \overline{entry_{WaitChanging_{lk_{NS}}}} \cdot T_{I_{lk_{NS}}}$$

$$WaitChanging_{lk_{NS}} = entry_{WaitChanging_{lk_{NS}}} \cdot \overline{activeT_{WaitChanging_{lk_{NS}}}} \cdot WaitChanging'_{lk_{NS}}$$

$$WaitChanging'_{lk_{NS}} = exit_{lk_{NS}} \cdot \overline{exitComplete_{lk_{NS}}} \cdot WaitChanging_{lk_{NS}}$$

6) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะย่อยภายในสถานะประกอบ *NSChangeWaiting* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงรูปแบบเส้นการเปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อไปยังสถานะประกอบจะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{WaitChanging_{R1_{NS}}} = activeT_{WaitChanging_{R1_{NS}}} \cdot T'_{WaitingChanging_{R1_{NS}}}$$

$$T'_{WaitingChanging_{R1_{NS}}} = changComplete_{TL_{ij}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{J_{R1_{NS}}}} \cdot T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$T_{WaitChanging_{R2_{NS}}} = activeT_{WaitChanging_{R2_{NS}}} \cdot T'_{WaitingChanging_{R2_{NS}}}$$

$$T'_{WaitingChanging_{R2_{NS}}} = changComplete_{TL_{lk}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{J_{R2_{NS}}}} \cdot T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$$

7) สถานะเชื่อมจากสถานะประกอบ *NSChangeWaiting* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$J_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = (entry_{J_{R1_{NS}}} | entry_{J_{R2_{NS}}}) \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{activeT_{J_{NS_{ijkl}}}} \cdot J'_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$J'_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = exit_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot J_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$$

8) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเชื่อม $J_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$ สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงรูปแบบเส้นการเปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อไปยังสถานะประกอบจะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{J_{NS_{ijkl}}} = activeT_{J_{NS_{ijkl}}} \cdot T'_{J_{NS_{ijkl}}}$$

$$T'_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = timeout_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{ij}}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{kl}}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$$

9) สถานะ *WE* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 1) ของการแปลงสถานะทั่วไปจะได้นิพจน์ดังนี้

$$WE_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{changeToGreen_{TL_{ki}}} \cdot \overline{changeToGreen_{TL_{jl}}} \cdot \overline{activeT_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot WE'_{Ctrl_{ijkl}}$$

$$WE'_{Ctrl_{ijkl}} = exit_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot WE_{Ctrl_{ijkl}}$$

10) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ *WE* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงรูปแบบเส้นการเปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อไปยังสถานะประกอบจะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} = activeT_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot T'_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$T'_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} = timeout_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{ki}}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{jl}}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot (\overline{entry_{I_{kiWE}}} \mid \overline{entry_{I_{jlWE}}}) \cdot T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$$

11) สถานะประกอบ *WELightChangeWaiting* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงสถานะประกอบ จะได้นิพจน์ดังนี้

$$WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot (WEChangeWaiting' \mid R1_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \mid R2_{WE_{Ctrl_{ijkl}}})$$

$WEChangeWaiting'_{Ctrl_{ijkl}} = exit_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}$ โดยที่

$$R1_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} = (new\ activeT_{I_{kiWE}}, exit_{ki_{WE}}, exitComplete_{ki_{WE}}, entry_{WaitChanging_{kiWE}}) (I_{ki_{WE}} \mid T_{I_{kiWE}} \mid WaitChanging_{ki_{WE}})$$

$$I_{ki_{WE}} = entry_{I_{kiWE}} \cdot \overline{activeT_{I_{kiWE}}} \cdot I'_{ki_{WE}}$$

$$I'_{ki_{WE}} = exit_{ki_{WE}} \cdot \overline{exitComplete_{ki_{WE}}} \cdot I_{ki_{WE}}$$

$$T_{I_{kiWE}} = activeT_{I_{kiWE}} \cdot T'_{I_{kiWE}}$$

$$T'_{I_{kiWE}} = \overline{exit_{ki_{WE}}} \cdot exitComplete_{ki_{WE}} \cdot \overline{entry_{WaitChanging_{kiWE}}} \cdot T_{I_{kiWE}}$$

$$WaitChanging_{ki_{WE}} = entry_{WaitChanging_{kiWE}} \cdot \overline{activeT_{WaitChanging_{kiWE}}} \cdot WaitChanging'_{ki_{WE}}$$

$$WaitChanging'_{ki_{WE}} = exit_{ki_{WE}} \cdot \overline{exitComplete_{ki_{WE}}} \cdot WaitChanging_{ki_{WE}}$$

$$R2_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} = (new\ activeT_{I_{jlWE}}, exit_{jl_{WE}}, exitComplete_{jl_{WE}}, entry_{WaitChanging_{jlWE}})$$
$$(I_{jl_{WE}} | T_{I_{jlWE}} | WaitChanging_{jl_{WE}})$$

$$I_{lk_{NS}} = entry_{I_{lk_{NS}}} \cdot \overline{activeT_{I_{lk_{NS}}}} \cdot I'_{lk_{NS}}$$

$$I'_{jl_{WE}} = exit_{jl_{WE}} \cdot \overline{exitComplete_{jl_{WE}}} \cdot I_{jl_{WE}}$$

$$T_{I_{jlWE}} = activeT_{I_{jlWE}} \cdot T'_{I_{jlWE}}$$

$$T'_{I_{jlWE}} = \overline{exit_{jl_{WE}}} \cdot exitComplete_{jl_{WE}} \cdot \overline{entry_{WaitChanging_{jlWE}}} \cdot T_{I_{jlWE}}$$

$$WaitChanging_{jl_{WE}} = entry_{WaitChanging_{jlWE}} \cdot \overline{activeT_{WaitChanging_{jlWE}}} \cdot WaitChanging'_{jl_{WE}}$$

$$WaitChanging'_{jl_{WE}} = exit_{jl_{WE}} \cdot \overline{exitComplete_{jl_{WE}}} \cdot WaitChanging_{jl_{WE}}$$

12) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะย่อยภายในสถานะประกอบ *WEChangeWaiting* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 2) ของการแปลงรูปแบบเส้นการเปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อไปยังสถานะประกอบจะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{WaitChanging_{R1WE}} = activeT_{WaitChanging_{R1WE}} \cdot T'_{WaitingChanging_{R1WE}}$$

$$T'_{WaitingChanging_{R1WE}} = changComplete_{TL_{ki}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{J_{R1WE}}} \cdot T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$T_{WaitChanging_{R2WE}} = activeT_{WaitChanging_{R2WE}} \cdot T'_{WaitingChanging_{R2WE}}$$

$$T'_{WaitingChanging_{R2WE}} = changComplete_{TL_{jl}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{J_{R2WE}}} \cdot T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$$

13) สถานะเชื่อมจากสถานะประกอบ *WEChangeWaiting* สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงสถานะทั่วไป จะได้นิพจน์ดังนี้

$$J_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} = (entry_{J_{R1WE}} | entry_{J_{R2WE}}) \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{activeT_{J_{WE_{ijkl}}}} \cdot J'_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$J'_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} = exit_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot J_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$$

14) เส้นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเชื่อม $J_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$ สามารถแปลงโดยใช้กฎข้อที่ 3) ของการแปลงรูปแบบเส้นการเปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อไปยังสถานะประกอบจะได้นิพจน์ดังนี้

$$T_{J_{WE_{ijkl}}} = activeT_{J_{WE_{ijkl}}} \cdot T'_{J_{WE_{ijkl}}}$$

$$\begin{aligned} T'_{J_{WE_{ijkl}}} = {} & timeout_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{ki}}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{jl}}} \\ & \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{NSLightChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \\ & \cdot (\overline{entry_{I_{ki_{NS}}}} \mid \overline{entry_{I_{jl_{NS}}}}) \cdot T_{J_{WE_{ijkl}}} \end{aligned}$$

จากองค์ประกอบย่อยทั้งหมด เราสามารถอธิบายพฤติกรรมของสัญญาณไฟจราจรได้ด้วยการอธิบายการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบทั้งหมดได้ด้วยนิพจน์ดังนี้

$$\begin{aligned} Ctrl_{ijkl} = {} & (new\ activeT_{I_{Ctrl_{ijkl}}}, exit_{Ctrl_{ijkl}}, exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \\ & , entry_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}, entry_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \\ & , activeT_{WaitChanging_{R1_{NS}}}, activeT_{WaitChanging_{R2_{NS}}}, entry_{J_{R1_{NS}}}, entry_{J_{R2_{NS}}}, activeT_{J_{NS_{ijkl}}} \\ & , entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}, entry_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \\ & , activeT_{WaitChanging_{R1_{WE}}}, activeT_{WaitChanging_{R2_{WE}}}, entry_{J_{R1_{WE}}}, entry_{J_{R2_{WE}}}, activeT_{J_{WE_{ijkl}}}) \\ & (I_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{I_{Ctrl_{ijkl}}} \\ & \mid NS_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \mid NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} \\ & \mid T_{WaitChanging_{R1_{NS}}} \mid T_{WaitChanging_{R2_{NS}}} \mid J_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \mid T_{J_{NS_{ijkl}}} \\ & \mid WE_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \mid WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} \\ & \mid T_{WaitChanging_{R1_{WE}}} \mid T_{WaitChanging_{R2_{WE}}} \mid J_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \mid T_{J_{WE_{ijkl}}}) \end{aligned}$$

จากนิพจน์ที่ได้จากการแปลงแผนภาพย่อยของวัตถุทั้งหมดในระบบ เราสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรทั้งหมด ดังนี้

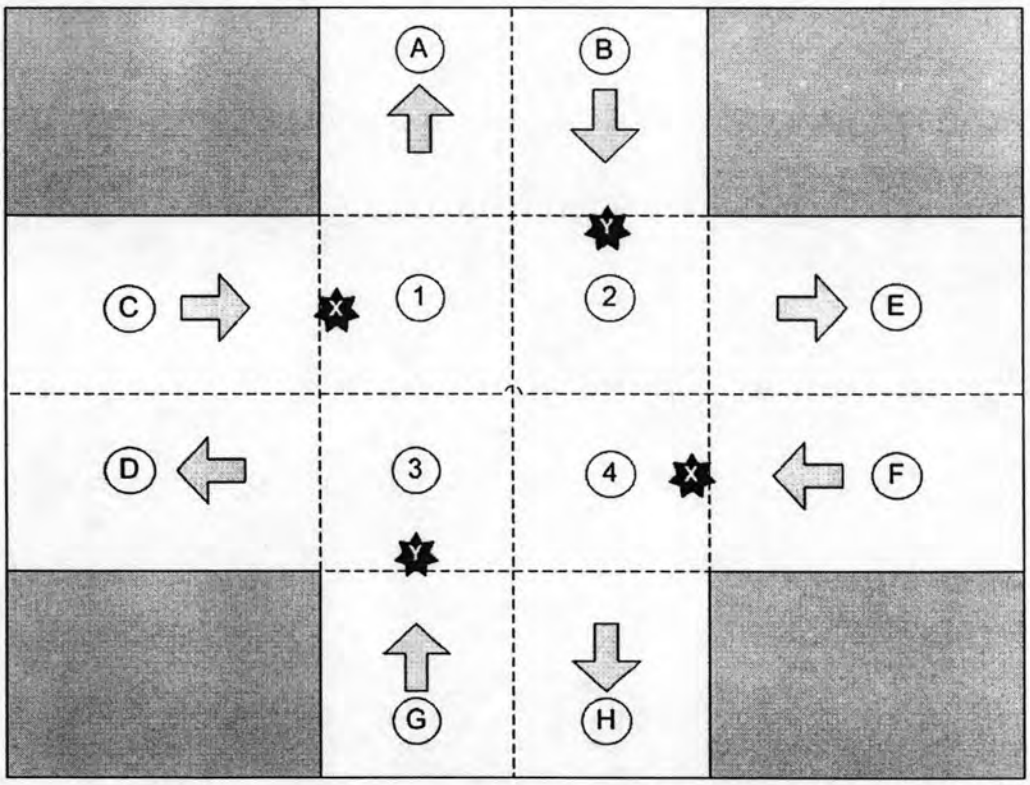
$$\begin{aligned} System_{1234} = {} & Ctrl_{1234} \mid TL_{12} \mid TL_{43} \mid TL_{31} \mid TL_{24} \\ & \mid Car_{12} \mid Car_{43} \mid Car_{31} \mid Car_{24} \mid R_1 \mid R_2 \mid R_3 \mid R_4 \end{aligned}$$

4.3 การตรวจสอบความสัมพันธ์ของวัตถุภายในระบบ

การตรวจสอบความสัมพันธ์ของวัตถุที่จะแสดงให้เห็นในระบบสัญญาณไฟจราจรแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ

4.3.1 การตรวจสอบความเท่าเทียมกันในด้านพฤติกรรมของวัตถุต่างๆ ในระบบ

ในตัวอย่างนี้เราจะแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงการทำงานของระบบไฟจราจร โดยการแทนที่ส่วนประกอบบางส่วนโดยส่วนประกอบใหม่ ซึ่งผลของพฤติกรรมตอบสนองของระบบที่ได้จากการทำงานของส่วนประกอบใหม่จะต้องไม่แตกต่างไปจากระบบเดิม

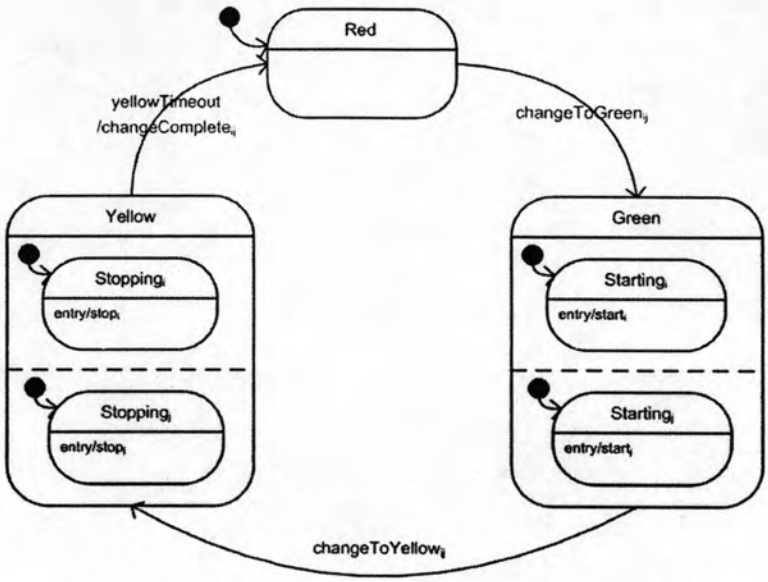


รูปที่ 4.11 แผนภาพสัญญาณไฟจราจรแบบใช้สัญญาณไฟร่วม

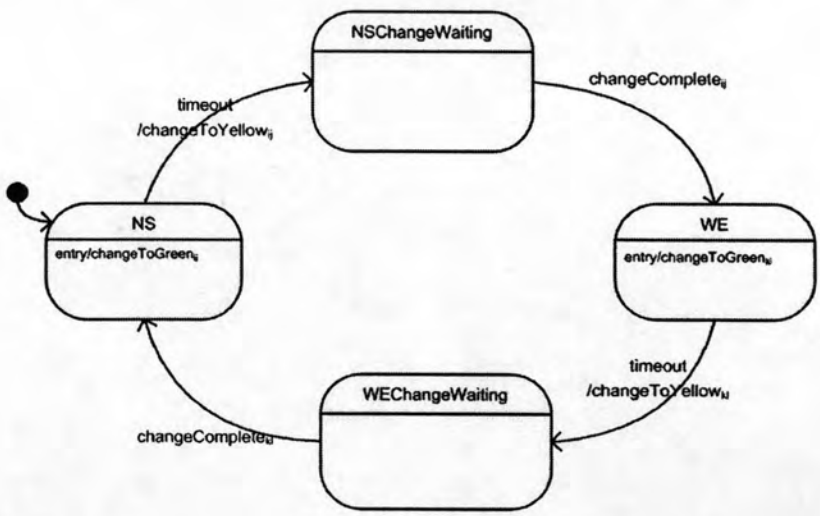
จากระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ออกแบบไว้เบื้องต้นในรูปที่ 4.1 นั้น จะเห็นว่ารถในเส้นทางที่วิ่งตรงกันข้ามกัน เช่น C ไป E และ F ไป D เป็นต้น สามารถวิ่งได้พร้อมกันเนื่องจากไม่ได้ใช้พื้นที่ถนนส่วนกลางร่วมกัน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่า เราสามารถยุบสัญญาณไฟจราจรลงเหลือเพียงสองจุดจากทั้งหมดจุด โดยสัญญาณไฟหนึ่งตัว จะเป็นตัวบอกให้รถที่วิ่งสวนทางกันวิ่งได้พร้อมกัน คือ C ไป E วิ่งได้พร้อม F ไป D และ G ไป A วิ่งได้พร้อมกับ B ไป H ดังรูปที่ 4.11 จะ

เหลือสัญญาณไฟเพียงสองตัว คือ X และ Y โดยในที่นี้ผู้วิจัยวาดภาพเป็นสี่จุด เพื่อให้สังเกตได้ง่าย ว่าเป็นตัวบอกสัญญาณของรถทิศทางใด

จากระบบที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวเราจำเป็นจะต้องออกแบบวัตถุใหม่สองตัว คือ สัญญาณไฟจราจร และตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 แผนภาพสถานะของสัญญาณไฟจราจรแบบใหม่



รูปที่ 4.13 แผนภาพสถานะของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบใหม่

ซึ่งผลจากการแปลงแผนภาพสถานะของสัญญาณไฟจราจรรูปที่ 4.12 จะได้ ดังนี้

$$TL_{ijkl} = (new\ activeT_{I_{TL_{ijkl}}}, exit_{TL_{ijkl}}, exitComplete_{TL_{ijkl}}, entry_{Red_{TL_{ijkl}}} \cdot activeT_{Red_{TL_{ijkl}}}$$
$$entry_{Green_{TL_{ijkl}}}, activeT_{Green_{TL_{ijkl}}}, entry_{Yellow_{TL_{ijkl}}}, activeT_{Yellow_{TL_{ijkl}}})$$
$$(I_{TL_{ijkl}} \mid T_{I_{TL_{ijkl}}} \mid Red_{TL_{ijkl}} \mid T_{Red_{TL_{ijkl}}} \mid Green_{TL_{ijkl}} \mid T_{Green_{TL_{ijkl}}} \mid Yellow_{TL_{ijkl}} \mid T_{Yellow_{TL_{ijkl}}})$$

โดยที่องค์ประกอบย่อยภายในที่นิพจน์เปลี่ยนแปลง คือ

$$I_{TL_{ijkl}} = entry_{I_{TL_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{I_{TL_{ijkl}}}} \cdot I'_{TL_{ijkl}}$$
$$I'_{TL_{ijkl}} = exit_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{TL_{ijkl}}} \cdot I_{TL_{ijkl}}$$
$$T_{I_{TL_{ijkl}}} = activeT_{I_{TL_{ijkl}}} \cdot T'_{I_{TL_{ijkl}}}$$
$$T'_{I_{TL_{ijkl}}} = \overline{exit_{TL_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{Red_{TL_{ijkl}}}} \cdot T_{I_{TL_{ijkl}}}$$
$$Red_{TL_{ijkl}} = entry_{Red_{TL_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{Red_{TL_{ijkl}}}} \cdot Red'_{TL_{ijkl}}$$
$$Red'_{TL_{ijkl}} = exit_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{TL_{ijkl}}} \cdot Red_{TL_{ijkl}}$$
$$T_{Red_{TL_{ijkl}}} = activeT_{Red_{TL_{ijkl}}} \cdot T'_{Red_{TL_{ijkl}}}$$
$$T'_{Red_{TL_{ijkl}}} = changeToGreen_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{Green_{TL_{ijkl}}}}$$
$$\cdot (\overline{entry_{I_{iGreen}}} \mid \overline{entry_{I_{jGreen}}}) \cdot T_{Red_{TL_{ijkl}}}$$
$$Green_{TL_{ijkl}} = entry_{Green_{TL_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{Green_{TL_{ijkl}}}}$$
$$\cdot (Green' \mid R1_{Green_{TL_{ijkl}}} \mid R2_{Green_{TL_{ijkl}}}) \cdot Green'_{TL_{ijkl}}$$
$$Green'_{TL_{ijkl}} = exit_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{TL_{ijkl}}} \cdot Green_{Ctrl_{ijkl}}$$
$$R1_{Green_{TL_{ijkl}}} = (new\ activeT_{I_{ijGreen}}, exit_{ijGreen}, exitComplete_{ijGreen}, entry_{Starting_{ijGreen}})$$
$$(I_{ijGreen} \mid T_{I_{ijGreen}} \mid Starting_{ijGreen})$$
$$Starting_{ijGreen} = entry_{Starting_{ijGreen}} \cdot \overline{start_{Car_{ij}}} \cdot Starting'_{ijGreen}$$
$$Starting'_{ijGreen} = exit_{ijGreen} \cdot \overline{exitComplete_{ijGreen}} \cdot Starting_{ijGreen}$$
$$+ inActiveT_{R1_{Green}} \cdot Starting_{ijGreen}$$
$$R2_{Green_{TL_{ijkl}}} = (new\ activeT_{I_{lkGreen}}, exit_{lkGreen}, exitComplete_{lkGreen}, entry_{Starting_{lkGreen}})$$
$$(I_{lkGreen} \mid T_{I_{lkGreen}} \mid Starting_{lkGreen})$$
$$Starting_{lkGreen} = entry_{Starting_{lkGreen}} \cdot \overline{start_{Car_{lk}}} \cdot Starting'_{lkGreen}$$
$$Starting'_{lkGreen} = exit_{lkGreen} \cdot \overline{exitComplete_{lkGreen}} \cdot Starting_{lkGreen}$$
$$+ inActiveT_{R2_{Green}} \cdot Starting_{lkGreen}$$
$$T_{Green_{TL_{ijkl}}} = activeT_{Green_{TL_{ijkl}}} \cdot T'_{Green_{TL_{ijkl}}}$$
$$T'_{Green_{TL_{ijkl}}} = changeToYellow_{TL_{ijkl}} \cdot (\overline{inactiveT_{R1_{Green}}} \mid \overline{inactiveT_{R1_{Green}}}) \cdot \overline{exit_{TL_{ijkl}}}$$
$$\cdot exitComplete_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{Yellow_{TL_{ijkl}}}} \cdot (\overline{entry_{I_{iYellow}}} \mid \overline{entry_{I_{jYellow}}}) \cdot T_{Green_{TL_{ijkl}}}$$

$$Yellow_{TL_{ijkl}} = entry_{Yellow_{TL_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{Yellow_{TL_{ijkl}}}} \cdot (Yellow' \mid R1_{Yellow_{TL_{ijkl}}} \mid R2_{Yellow_{TL_{ijkl}}}) \cdot Yellow'_{TL_{ijkl}}$$

$$Yellow'_{TL_{ijkl}} = exit_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{exitComplete_{TL_{ijkl}}} \cdot Yellow_{TL_{ijkl}}$$

$$R1_{Yellow_{TL_{ijkl}}} = (new\ activeT_{I_{iYellow}}, exit_{i_{Yellow}}, exitComplete_{i_{Yellow}}, entry_{Stopping_{iYellow}}) (I_{i_{Yellow}} \mid T_{I_{iYellow}} \mid Stopping_{i_{Yellow}})$$

$$Stopping_{ij_{Yellow}} = entry_{Stopping_{ijYellow}} \cdot \overline{stop_{Car_{ij}}} \cdot Stopping'_{ij_{Yellow}}$$

$$Stopping'_{ij_{Yellow}} = exit_{ij_{Yellow}} \cdot \overline{exitComplete_{ij_{Yellow}}} \cdot Starting_{ij_{Yellow}} + inActiveT_{R1_{Yellow}} \cdot Stopping_{ij_{Yellow}}$$

$$R2_{Yellow_{TL_{ijkl}}} = (new\ activeT_{I_{lkYellow}}, exit_{lk_{Yellow}}, exitComplete_{lk_{Yellow}}, entry_{Starting_{lkYellow}}) (I_{lk_{Yellow}} \mid T_{I_{lkYellow}} \mid Stopping_{lk_{Yellow}})$$

$$Stopping_{lk_{Yellow}} = entry_{Stopping_{lkYellow}} \cdot \overline{stop_{Car_{lk}}} \cdot Stopping'_{lk_{Yellow}}$$

$$Stopping'_{lk_{Yellow}} = exit_{lk_{Yellow}} \cdot \overline{exitComplete_{lk_{Yellow}}} \cdot Starting_{lk_{Yellow}} + inActiveT_{R2_{Yellow}} \cdot Stopping_{lk_{Yellow}}$$

$$T_{Yellow_{TL_{ijkl}}} = activeT_{Yellow_{TL_{ijkl}}} \cdot T'_{Yellow_{TL_{ijkl}}}$$

$$T'_{Yellow_{TL_{ijkl}}} = yellowTimeout_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{changeComplete_{TL_{ijkl}}} \cdot (\overline{inactiveT_{R1_{Yellow}}} \mid \overline{inactiveT_{R1_{Yellow}}}) \cdot \overline{exit_{TL_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{Red_{TL_{ijkl}}}} \cdot T_{Yellow_{TL_{ijkl}}}$$

$$T'_{Green_{TL_{ijkl}}} = changeToYellow_{TL_{ijkl}} \cdot (\overline{inactiveT_{R1_{Green}}} \mid \overline{inactiveT_{R1_{Green}}}) \cdot \overline{exit_{TL_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{TL_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{Yellow_{TL_{ijkl}}}} \cdot (\overline{entry_{I_{iYellow}}} \mid \overline{entry_{I_{jYellow}}}) \cdot T_{Green_{TL_{ijkl}}}$$

และผลจากการแปลงแผนภาพสถานะของตัวควบคุมจากรูปที่ 4.9 จะได้ ดังนี้

$$Ctrl_{ijkl} = (new\ activeT_{I_{Ctrl_{ijkl}}}, exit_{Ctrl_{ijkl}}, exitComplete_{Ctrl_{ijkl}}, entry_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}, entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}) (I_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{I_{Ctrl_{ijkl}}} \mid NS_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \mid NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \mid WE_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \mid WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}})$$

โดยที่องค์ประกอบย่อยภายในที่นิพจน์เปลี่ยนแปลง คือ

$$NS_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{changeToGreen_{TL_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot NS'_{Ctrl_{ijkl}}$$

$$T'_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} = timeout_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{ijkl}}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot NSChangeWaiting'_{Ctrl_{ijkl}}$$

$$T'_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} = changeComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$WE_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{changeToGreen_{TL_{jlik}}} \cdot \overline{activeT_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot WE'_{Ctrl_{ijkl}}$$

$$T'_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} = timeout_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{changeToYellow_{TL_{jlik}}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}$$

$$WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} = entry_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot \overline{activeT_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot WEChangeWaiting'_{Ctrl_{ijkl}}$$

$$T'_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} = changeComplete_{Ctrl_{jlik}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}$$

เราสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรทั้งหมดที่ถูกแก้ไขโดยยุบสัญญาณไฟจราจรเหลือเพียงสองสัญญาณ ดังนี้

$$System_{1234} = Ctrl_{1234} \mid TL_{1243} \mid TL_{3124} \mid Car_{12} \mid Car_{43} \mid Car_{31} \mid Car_{24} \mid R_1 \mid R_2 \mid R_3 \mid R_4$$

การตรวจสอบความเท่าเทียมกันของพฤติกรรมจะพิจารณาจากองค์ประกอบของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในที่นี้เมื่อพิจารณาจากระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรเดิมที่ได้ถูกออกแบบไว้เปรียบเทียบกับระบบที่ได้รับการปรับปรุง พบว่าองค์ประกอบที่ได้รับการเปลี่ยนแปลง คือ สัญญาณไฟจราจร และตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร คือ $Ctrl_{1234} \mid TL_{12} \mid TL_{43} \mid TL_{31} \mid TL_{24}$ ในระบบเดิม เปลี่ยนเป็น $Ctrl_{1234} \mid TL_{1243} \mid TL_{3124}$ ในระบบใหม่

ในการพิจารณาความเท่าเทียมกันของระบบนั้น เราจะพิจารณาพฤติกรรมที่แต่ละระบบตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องทำการซ่อนพฤติกรรมที่มีการสื่อสารภายในระหว่างสัญญาณไฟจราจรกับตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร ดังนิพจน์ด้านล่าง โดยให้ $CtrlTL_{1243}$ แทนการทำงานของสัญญาณไฟจราจรและตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรของระบบเดิม และให้ New_CtrlTL_{1243} แทนการทำงานของสัญญาณไฟจราจรและตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรของระบบที่ได้ถูกออกแบบใหม่

$$CtrlTL_{1234} = (new\ changeToYellow_{TL_{12}}, changeToYellow_{TL_{43}}, changeToYellow_{TL_{31}}, changeToYellow_{TL_{24}}, changeToGreen_{TL_{12}}, changeToGreen_{TL_{43}}, changeToGreen_{TL_{31}}, changeToGreen_{TL_{24}})$$
$$(Ctrl_{1234} \mid TL_{12} \mid TL_{43} \mid TL_{31} \mid TL_{24})$$

$$New_CtrlTL_{1234} = (new\ changeToYellow_{TL_{1234}}, changeToYellow_{TL_{3224}}, changeToGreen_{TL_{1234}}, changeToGreen_{TL_{3224}})$$
$$(Ctrl_{1234} \mid TL_{1243} \mid TL_{3124})$$

ซึ่งผลจากการประมวลผลการทำงานพฤติกรรมของ $CtrlTL_{1243}$ นั้นจะได้กลุ่มของพฤติกรรมที่สามารถเกิดขึ้นได้ต่อสิ่งแวดล้อมดังนี้

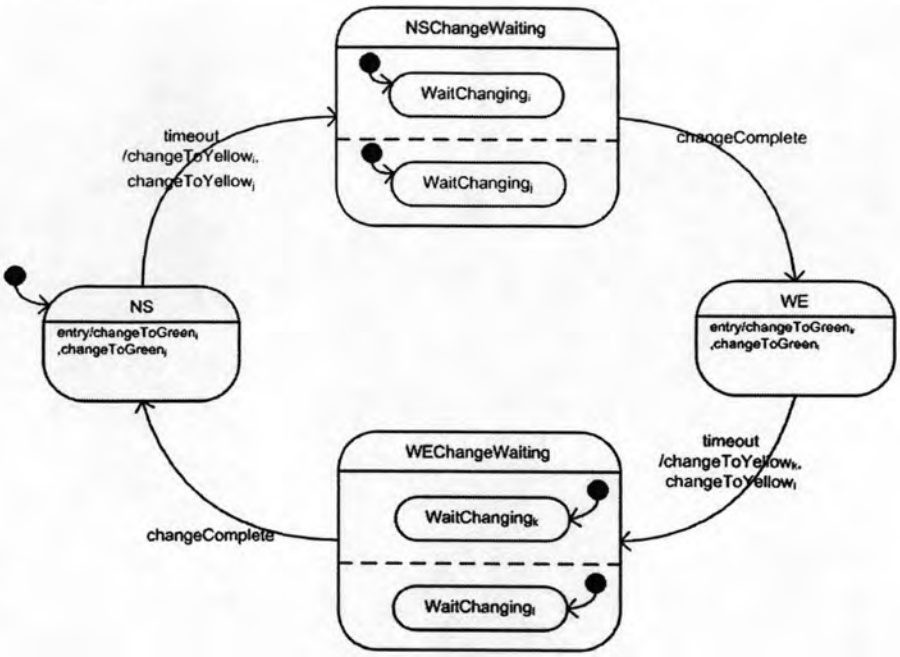
$$(start_{Car_{12}} \mid start_{Car_{43}}) \cdot (stop_{Car_{12}} \mid stop_{Car_{43}}) \cdot (start_{Car_{31}} \mid start_{Car_{24}}) \cdot (stop_{Car_{31}} \mid stop_{Car_{24}})$$

และกลุ่มของพฤติกรรมที่สามารถเกิดขึ้นได้ต่อสิ่งแวดล้อมของ New_CtrlTL_{1243} คือ

$$(start_{Car_{12}} \mid start_{Car_{43}}) \cdot (stop_{Car_{12}} \mid stop_{Car_{43}}) \cdot (start_{Car_{31}} \mid start_{Car_{24}}) \cdot (stop_{Car_{31}} \mid stop_{Car_{24}})$$

ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากพฤติกรรมของสัญญาณไฟจราจรกับตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรของระบบใหม่จะเท่ากับพฤติกรรมของสัญญาณไฟจราจรกับตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรของระบบเดิม

4.3.2 การตรวจสอบพฤติกรรมการทำงานของวัตถุเมื่อทำงานร่วมกับวัตถุอื่นภายในระบบ



รูปที่ 4.14 แผนภาพสถานะตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ออกแบบผิดพลาด

ในตัวอย่างนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลจากการออกแบบที่ผิดพลาดของระบบ โดยจะขอยกตัวอย่างการออกแบบที่ผิดพลาดของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร โดยทำการเปลี่ยนเส้นการเปลี่ยนแปลงออกจากสถานะประกอบ *NSChangeWaiting* และ *WEChangeWaiting* จากเดิมที่เชื่อมโยงออกจากสถานะย่อยในแต่ละพื้นที่ย่อย ไปเป็นเชื่อมโยงจากสถานะประกอบแทนดังรูปที่ 4.14 ซึ่งหากผู้ออกแบบมองแผนภาพเพียงแผนภาพเดียวโดยไม่ได้เปรียบเทียบการทำงานร่วมกับแผนภาพอื่น จะพบว่าแผนภาพนี้มีการออกแบบที่ถูกต้อง แต่เมื่อตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรทำงานจริงร่วมกับสองสัญญาณไฟจราจรจะพบข้อผิดพลาดคือ สัญญาณส่งกลับจากสัญญาณไฟจราจรเพื่อแจ้งการเปลี่ยนสัญญาณไฟเสร็จเรียบร้อย คือ *changeComplete* จะมีสองสัญญาณ แต่ตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรจะมีส่วนที่รอรับเพียงส่วนเดียว ซึ่งผลของการทำงานจะทำให้เกิดการทำงานที่ชะงัก (deadlock) ของระบบ

จากแผนภาพสถานะของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรในรูปที่ 4.14 จะได้นิพจน์ดังนี้

$$
\begin{aligned}
Ctrl_{ijkl} = (&new\ activeT_{I_{Ctrl_{ijkl}}}, exit_{Ctrl_{ijkl}}, exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \\
&, entry_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}, entry_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \\
&, entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}, entry_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}, activeT_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}) \\
&(I_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{I_{Ctrl_{ijkl}}} \\
&\mid NS_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{NS_{Ctrl_{ijkl}}} \mid NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{NSChangWaitng_{Ctrl_{ijkl}}} \\
&\mid WE_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{WE_{Ctrl_{ijkl}}} \mid WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}} \mid T_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}})
\end{aligned}
$$

โดยที่องค์ประกอบย่อยภายในที่นิพจน์เปลี่ยนแปลง คือ

$$
\begin{aligned}
T_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} &= activeT_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot T'_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \\
T'_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} &= changeComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \\
&\quad \cdot \overline{entry_{WE_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{NSChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \\
T_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} &= activeT_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot T'_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} \\
T'_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}} &= changeComplete_{Ctrl_{ijkl}} \cdot \overline{exit_{Ctrl_{ijkl}}} \cdot exitComplete_{Ctrl_{ijkl}} \\
&\quad \cdot \overline{entry_{NS_{Ctrl_{ijkl}}}} \cdot T_{WEChangeWaiting_{Ctrl_{ijkl}}}
\end{aligned}
$$

จากนิพจน์อธิบายตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ผิดพลาด หากเราพิจารณาพฤติกรรมที่สามารถเกิดขึ้นได้ต่อสิ่งแวดล้อมของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร จะได้ดังนี้

$$
\begin{aligned}
&(changeToGreen_{TL_{12}} \cdot changeToGreen_{TL_{43}}) \cdot (changeToYellow_{TL_{12}} \cdot changeToYellow_{TL_{43}}) \\
&\cdot (changeComplete) \\
&\cdot (changeToGreen_{TL_{31}} \cdot changeToGreen_{TL_{24}}) \cdot (changeToYellow_{TL_{31}} \cdot changeToYellow_{TL_{24}}) \\
&\cdot (changeComplete) \\
&\cdot (changeToGreen_{TL_{12}} \cdot changeToGreen_{TL_{43}}) \cdot \ldots
\end{aligned}
$$

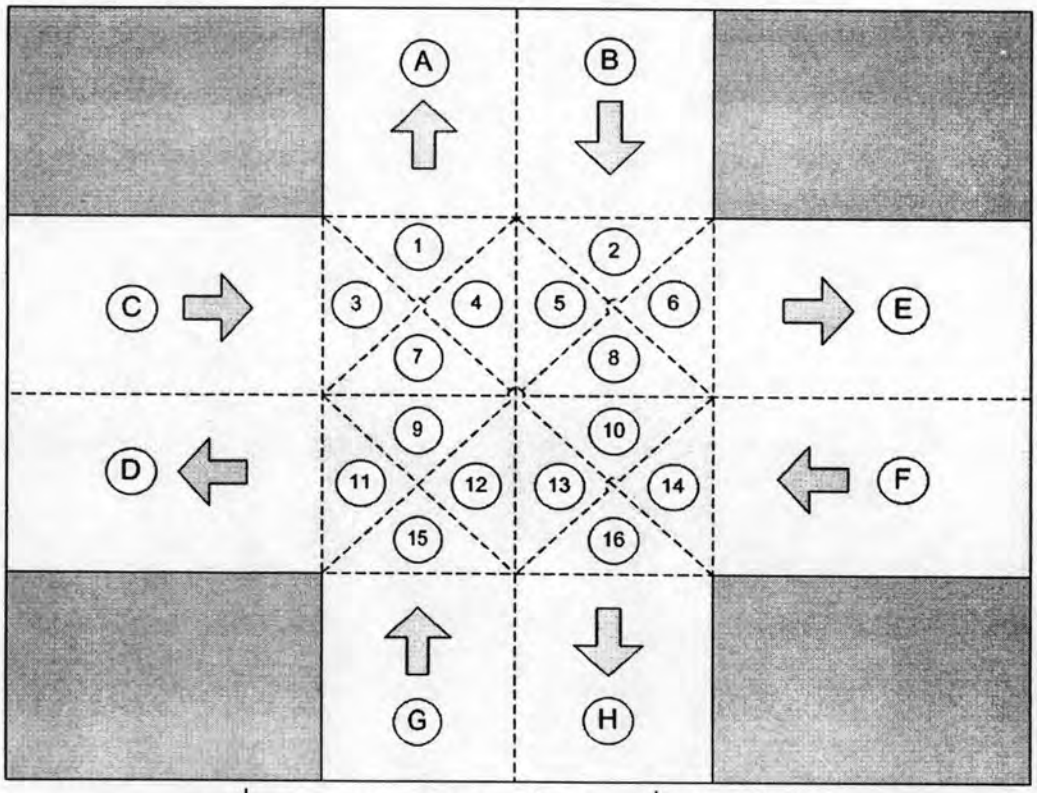
แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรควบคู่กับสี่สัญญาณไฟจราจรพบว่าระบบเกิดการทำงานชะงักขึ้น เมื่อเข้าสู่รอบการเปลี่ยนแปลงไฟในรอบที่สอง ดังพฤติกรรมด้านล่าง

$$
\begin{aligned}
&(changeToGreen_{TL_{12}} \cdot changeToGreen_{TL_{43}}) \cdot (changeToYellow_{TL_{12}} \cdot changeToYellow_{TL_{43}}) \\
&\cdot (changeComplete) \\
&\cdot (changeToGreen_{TL_{31}} \cdot changeToGreen_{TL_{24}}) \cdot (changeToYellow_{TL_{31}} \cdot changeToYellow_{TL_{24}}) \\
&\cdot (changeComplete) \\
&\cdot (changeToGreen_{TL_{12}}
\end{aligned}
$$

ซึ่งผลที่ได้ คือ พฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรเมื่อทำงานแยกเดี่ยวไม่เท่ากับพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรเมื่อทำงานร่วมกับสัญญาณไฟจราจร ซึ่งเป็นส่วนช่วยให้ผู้ออกแบบระบบสามารถตรวจพบข้อผิดพลาดในการออกแบบได้

4.4 สรุปผลการแปลงและตรวจสอบ

จากกรณีศึกษาของการแปลงแผนภาพสถานะยูเอ็มแอลไปเป็นไพแคลคูลัสนั้น พบว่าขั้นตอนการแปลงโดยการพิจารณาส่วนของการแปลงเป็นจุดๆ ร่วมกับองค์ประกอบที่เชื่อมต่อติดกันสามารถทำได้โดยง่าย และในส่วนของการตรวจสอบความสัมพันธ์ของแผนภาพนั้น พบว่าเมื่อเราทำการแทนส่วนประกอบหนึ่งๆ ด้วยส่วนประกอบใหม่ เราสามารถตรวจสอบพฤติกรรมของระบบใหม่เทียบกับพฤติกรรมของระบบเดิมที่มีอยู่แล้วได้ ซึ่งจะเป็นส่วนช่วยให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบระบบใหม่เพื่อแทนที่ระบบเดิมได้ และในการตรวจสอบพฤติกรรมของวัตถุเมื่อทำงานร่วมกับวัตถุอื่นๆ ภายในระบบจะพบว่ามีความสามารถช่วยค้นหาจุดบกพร่องในการออกแบบได้



รูปที่ 4.15 แผนภาพสัญญาณไฟจราจรที่มีความซับซ้อน

ระบบสัญญาณไฟจราจรที่ได้นำเสนอในกรณีศึกษานี้เป็นเพียงตัวอย่างระบบจราจรอย่างง่ายเท่านั้น ซึ่งในการใช้งานจริงในชีวิตประจำวันนั้นระบบจะมีความซับซ้อนกว่านี้เป็นอย่างมาก

เช่น ในตัวอย่างรูปที่ 4.15 ซึ่งรถสามารถเดินทางได้หลายเส้นทาง คือ ทางตรง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา เลี้ยวกลับ ซึ่งในกรณีนี้การใช้พื้นที่ถนนส่วนกลางจะแตกต่างไป จำเป็นต้องแบ่งพื้นที่ให้ละเอียดยิ่งขึ้น กำหนดการใช้ถนนของแต่ละทิศทางให้ถูกต้อง ต้องเพิ่มสัญญาณไฟจราจรเพื่อให้สัญญาณการเดินรถในทิศทางต่างๆ รวมถึงออกแบบตัวควบคุมสัญญาณไฟให้ถูกต้อง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในระบบที่มีความซับซ้อนดังกล่าว หากเราสามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของแต่ละวัตถุให้อยู่ในรูปของแผนภาพสถานะแล้ว เราก็สามารถแปลงแผนภาพดังกล่าวเป็นไพแคลคูลัสจากกฎการแปลง และตรวจสอบการออกแบบจากกฎการตรวจสอบที่ผู้วิจัยได้นำเสนอเช่นกัน