การจำลองแบบเชิงคอมพิวเตอร์สำหรับโรคไข้หวัดใหญ่ สายพันธุ์ใหม่ชนิด A (H1N1) ด้วยวิธี Cellular Automata

ศิริชัย ภูมิใจสกุล

Biophysics Group, Faculty of science, Mahidol University

บทคัดย่อ (Abstract)

รายงานนี้เป็นการนำเสนอการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ สายพันธุ์ใหม่ชนิด A(H1N1) ด้วยวิธี Cellular Automata ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง Stochastic เพื่อให้เป็นการสอดคล้องกับสถานการณ์ที่เป็นอยู่ในปัจจุบันจึงออกแบบตามกลไกของโรคให้ใกล้เคียงที่สุด จุดประสงค์คือการนำเสนอการแพร่ระบาดของโรคและศึกษาถึงพฤติกรรมของโรคนี้ จะได้เป็นการตั้งรับและป้องกันถึงการเป็นไปในอนาคตได้

1. บทนำ (Introduction)

การจำลองแบบคอมพิวเตอร์นี้เป็นโมเดลชนิด Cellular Automata เป็นการแพร่ระบาดในระนาบสองมิติ โดยการเขียนโปรแกรมจำลองสถานการณ์รูปแบบ SEIR ด้วยโปรแกรม MATLAB จุดประสงค์เพื่อเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป และเป็นการอธิบายการแพร่กระจายของผู้ติดเชื้อและทำนายถึงจำนวนผู้ติดเชื้อและจำนวนผู้ที่จะเสียชีวิตได้

1.1 Stochastic Model

Stochastic หมายถึง ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยการสุ่ม แบบจำลอง stochastic เป็นเครื่องมือสำหรับการประมาณการกระจายตัวความน่าจะเป็นของผลที่จะเกิดขึ้นโดยการยอมให้ตัวแปรที่มีการสุ่มตัวใดตัวหนึ่งหรือมากกว่าที่ใส่เข้ามามีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป แบบจำลอง stochastic ขึ้นอยู่กับโอกาสความเสี่ยงของโรคที่ติดต่อและการติดต่ออื่นๆที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วย การใช้ CA มักใช้เมื่อมีการผันแปรเป็นสำคัญในกลุ่มของประชากรเล็กๆ[1]

1.2 Cellular Automata (CA)

Cellular Automata หรือ Cellular Maton เป็นแบบจำลองชนิดหนึ่งประกอบไปด้วยหลายแขนงวิชามารวมกันได้แก่ ทฤษฎีคอมพิวเตอร์ คณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ ชีววิทยา และการจำลองแบบ

---

[1] Trottier & Philippe, 2001

ขนาดเล็ก CA ประกอบไปด้วยเซลล์หลายๆเซลล์ โดยแต่ละเซลล์จะประกอบไปด้วยเซลล์ข้างเคียง (Neighborhood) ที่อยู่โดยรอบและเซลล์ที่เราสนใจก็ยังนับเป็นเซลล์ข้างเคียงได้ด้วย เซลล์ทั้งหมดนี้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของระนาบสองมิติที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

นิยามของ CA คือ ระบบที่มีการเคลื่อนที่ซึ่งแยกกันอย่างชัดเจนของพื้นที่และเวลา กระทำบนรูปแบบเดียวกัน บนแลตทิซ (Lattice) หรืออาเรย์ (Array) ที่ n มิติและมีปฏิสัมพันธ์เฉพาะกันแผ่ขยายออกไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุด แบบจำลอง CA มักถูกใช้ในระบบที่มีความซับซ้อนซึ่งได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่ถูกรวมความรู้เข้าด้วยกันหลายๆอย่างทางกายภาพในพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์กันอย่างซับซ้อน ทั้งยังแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนไปที่ซับซ้อนและอธิบายระบบทางกายภาพกับกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

สมบัติทั่วไปของ Cellular Automata ประกอบไปด้วย 5 คุณสมบัติ ดังนี้

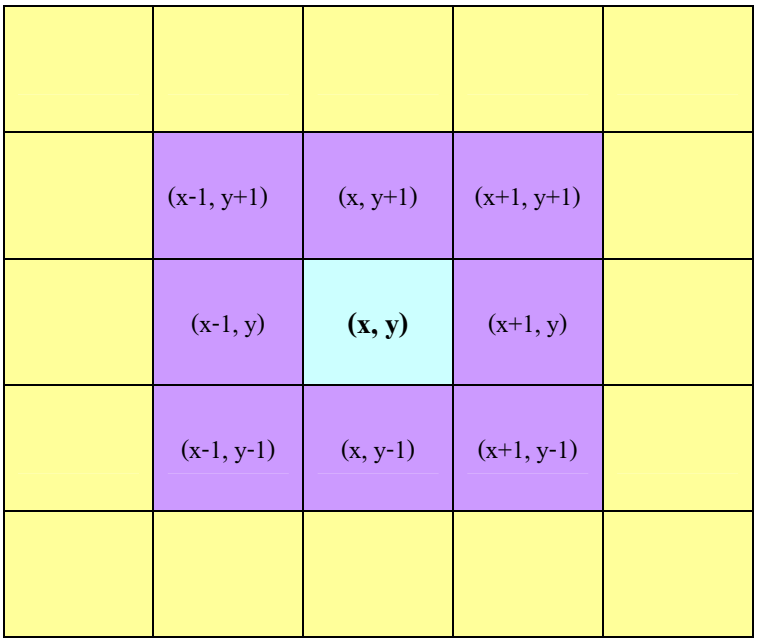
1. จำนวนมิติ ที่แผ่ขยายออกไป เช่น ขนาด 2 มิติ (2D)

2. ความกว้างของแต่ละอาเรย์ ขนาด NxN

3. จำนวนของเซลล์ข้างเคียงที่

4. สถานะของ Cellular Automata เริ่มต้น

5. กฎของ Cellular Automata ขึ้นกับเงื่อนไขหรือกติกาที่ตั้งไว้ในแต่ละขั้นตอนของแต่ละเซลล์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนไป (t+1) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณที่ถูกกำหนด กติกาเหล่านี้คือฟังก์ชั่นของแต่ละขั้นตอนในเซลล์เมื่อเวลาผ่านไปและรวมถึงขั้นตอนของเซลล์ข้างเคียงที่เวลาผ่านไปเท่ากัน ในกรณีของเซลล์สองมิติ (n=2) ความกว้างของเซลล์รอบๆจะเท่ากับ 3x3 [2]



รูปแสดงเซลล์ที่สนใจ คือ (x, y) บนระนาบสองมิติ มีเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดแปดเซลล์

1.3 วิทยาการระบาด (Epidemiology)[2]

เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสุขภาพและความเจ็บป่วยของประชากร และเป็นพื้นฐานและตรรกะที่ทำให้เกิดแนวคิดความสนใจในสาธารณสุขและเวชศาสตร์ป้องกัน สาขาวิชานี้วิธีที่สำคัญพื้นฐานของงานวิจัยด้านสาธารณสุข และเกี่ยวข้องกับเวชศาสตร์อิงหลักฐาน ในการหาปัจจัยเสี่ยงของโรคและประเมินวิธีการรักษาที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับการแพร่ระบาดโรคไข้หวัดนั้นองค์การอนามัยโลกได้แบ่งการจำแนกการระบาดโรคออกเป็น 6 เฟส ดังนี้

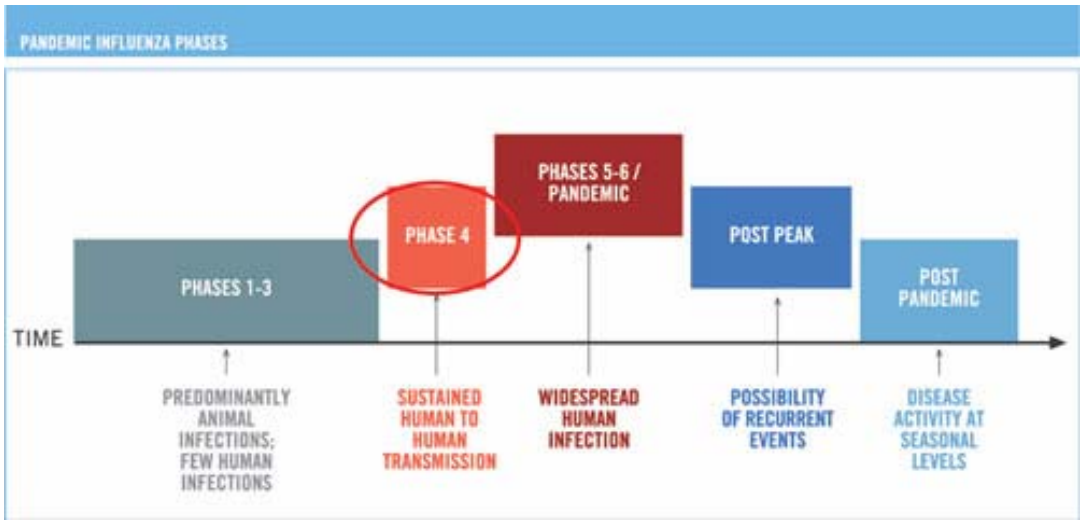
- เฟส 1 คือ ไม่พบไวรัสในสัตว์ (ที่อาจเป็นแหล่งสะสมโรค) ที่จะเป็นสาเหตุการระบาดของมนุษย์
- เฟส 2 คือ พบโรคระบาดในสัตว์ที่จะเป็นสาเหตุการระบาดของมนุษย์และมีโอกาสที่จะระบาดได้ในอนาคต
- เฟส 3 คือ พบโรคระบาดในสัตว์ กระจายมาสู่คนแบบ “สัตว์-สู่-คน” หรือมีการติดต่อจาก “คน-สู่-คน” ในวงแคบ เช่น ติดโรคไปสู่คนที่ดูแลรักษา หรือสัมผัสโดยตรง ฯลฯ ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการระบาดในวงกว้าง หรือชุมชน
- เฟส 4 คือ ตรวจพบการกระจายโรคแบบ “คน-สู่-คน” ในระดับชุมชน
- เฟส 5 คือ มีการกระจายของโรคแบบ “คน-สู่-คน” ในวงกว้างอย่างน้อย 2 ประเทศในภูมิภาคเดียวกัน (เป็นเขตที่องค์การอนามัยโลกกำหนด)
- เฟส 6 คือ ระยะระบาดไปทั่วโลก (pandemic phase) มีการกระจายโรคแบบ “คน-สู่-คน” เป็นจำนวนมาก

สำหรับช่วงการแบ่งเฟสแบ่งออกเป็น 3 ช่วงก่อนได้แก่

- ช่วงเฟส 1-3 คือ Preparedness เป็นระยะเตรียมพร้อมมีการระบาดในสัตว์เป็นหลัก มีคนติดโรคน้อยมาก
- ช่วงเฟส 4-6 คือ Need for response & mitigation efforts เป็นระยะที่ต้องการการตอบสนอง (ลงมือทำ) และทำงานบรรเทาสาธารณภัย
- ช่วงหลังเฟส 6 คือ Post peak & Post pandemic เป็นระยะหลังจุดที่เกิดภัยพิบัติสูงสุด และหลังระยะระบาดในวงกว้าง โดย postpeak = ระยะที่อาจมีการกำเริบ หรือระบาดซ้ำ และ postpandemic = ระยะกลับเข้าสู่ระยะที่โรคพบมากเป็นบางฤดูกาล

---

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/Epidemiology



รูปแสดงเฟสการเตือนภัยโรคระบาดไข้หวัดใหญ่ขององค์การอนามัยโลก (WHO) ซึ่งไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์ใหม่ 2009 นี้ถูกประกาศให้อยู่ในเฟส 4 มีการกระจายโรคแบบ “คน-สู่-คน” ในระดับชุมชน

ที่มา: http://www.who.int/csr/disease/avian_influenza/phase/en/index.html

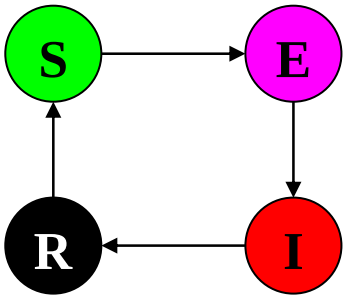
2. แบบจำลองการแพร่ระบาด (Epidemic Models)

SEIRS Models [4]

สำหรับโรคระบาดของไข้หวัดใหญ่ให้สมมติประชากรคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อในกลุ่มประชากรดังกล่าวเริ่มพบผู้ติดเชื่อเกิดขึ้นมาก็จะเกิดการแพร่กระจายออกไปตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงและเป็นไปตามกลไกของโรคไข้หวัดใหญ่ แบ่งประชากรออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

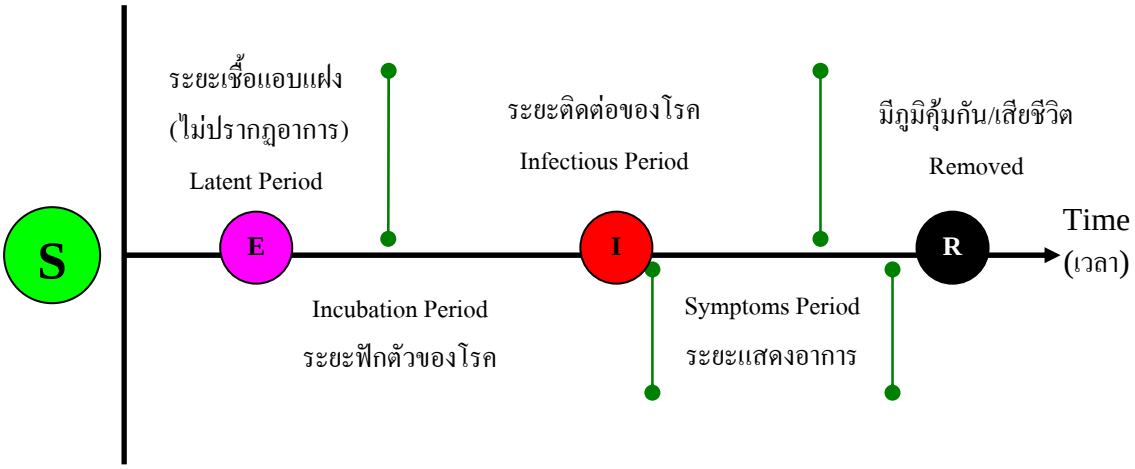
1. กลุ่มคนเสี่ยงติดเชื้อ (Susceptible, S)
2. กลุ่มคนเสี่ยงที่ได้รับเชื้อแต่ยังไม่แสดงอาการออกมา (Exposed, E)
3. กลุ่มคนเสี่ยงที่ติดเชื้อพร้อมแสดงอาการออกมา (Infected, I)
4. กลุ่มคนที่ได้ติดเชื้อแล้วหายโดยการพัฒนาภูมิคุ้มกัน (Immune) หรือตาย (Dead) และกลุ่มคนที่หายยังอาจจะเป็นกลุ่มคนเสี่ยงติดเชื้อได้อีก (Removed, R)

โดยการดำเนินไปของโรคไข้หวัดใหญ่ด้วยการติดต่อกันเป็นไปตามแผนภาพอย่างง่าย ดังนี้



รูปแสดงแบบจำลอง SEIRS

โรคไข้หวัดใหญ่จะมีช่วงเวลาที่แตกต่างกันออกไปสัมพันธ์กับแบบจำลอง SEIR แสดงดังรูปข้างล่าง



รูปภาพแสดงช่วงเวลาของโรคไข้หวัดใหญ่

3. แบบจำลอง Cellular Automata สำหรับการระบาดไข้หวัดใหญ่ (Cellular Automata for Influenza Disease)

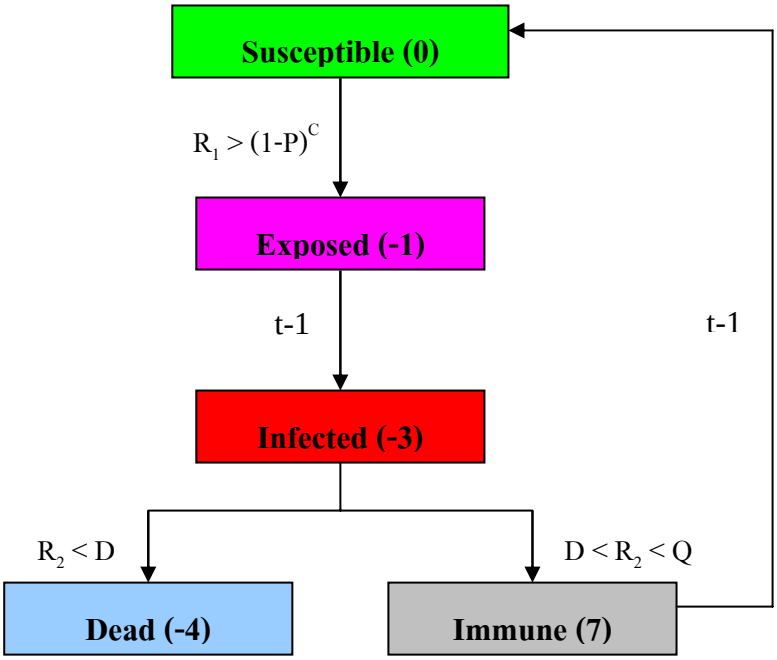
3.1 การออกแบบเซลล์ (Cell Designed)

การออกแบบเซลล์ได้กำหนดพื้นที่ที่จะใช้แสดงการแพร่กระจายของแต่ละเซลล์ออกเป็นขนาด NxN เซลล์ โดยในที่นี้สมมติให้ประชากรแบ่งออกเป็นแต่ละเซลล์ ดังนี้

- เซลล์ประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อ (Susceptible) สมมติให้เป็นเซลล์สีเขียวและกำหนดค่าตัวเลขเป็น “0”
- เซลล์ประชากรที่ได้รับเชื้อ (Exposed) สมมติให้เป็นเซลล์สีชมพูและกำหนดค่าตัวเลขเป็น “-1”
- เซลล์ประชากรที่ติดเชื้อ (Infected) สมมติให้เป็นเซลล์สีแดงและกำหนดค่าตัวเลขเป็น “-3”
- เซลล์ประชากรที่ได้ติดเชื้อแล้วหายโดยการพัฒนาภูมิคุ้มกัน (Immune) สมมติให้เป็นเซลล์สีดำและกำหนดค่าตัวเลขเป็น “7”
- เซลล์ประชากรที่เสียชีวิตจากการเป็นโรคไข้หวัดใหญ่ (Dead) สมมติให้เป็นเซลล์สีฟ้าและกำหนดค่าตัวเลขเป็น “-4”

3.2 ลำดับขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง (Algorithm)

เริ่มต้นจากประชากรปกติที่เสี่ยงติดเชื้อ (Susceptible) ได้มีประชากรข้างเคียงที่มีเชื้อไข้หวัดมาอยู่โดยรอบของประชากรปกติเป็นซึ่งถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขของ $R_1 > (1\text{-}P)^C$ ประชากรปกติก็ได้รับเชื้อเป็นประชากรที่ได้รับเชื้อ (Exposed) เป็นระยะที่เชื้อโรคแอบแฝงยังไม่แสดงอาการแต่อย่างใด เมื่อเวลาผ่านไป (t-1) ประชากรดังกล่าวมีอาการป่วยแสดงออกมา เช่น ตัวร้อน มีไข้สูง เป็นต้น แสดงว่าประชากรนี้ได้ติดเชื้อแล้ว (Infected) ทันทีที่พบว่าป่วยก็จะมีการเสียชีวิตจากโรคนี้เป็นไปตามเงื่อนไข $R_3 < D$ หรืออาจจะมีการรักษาหายจนร่างกายพัฒนามีภูมิคุ้มกันเป็นไปตามเงื่อนไข $D < R_3 < Q$ ทั้งนี้ประชากรที่รักษาหายเป็นปกติเมื่อเวลาผ่านไปก็ยังมีโอกาสเสี่ยงติดเชื้อได้อีกเช่นเคย เป็นไปตามแผนภาพ



รูปแสดงแผนภาพแบบจำลอง

กำหนดตัวแปร

P = ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (Probability of infection)

C = จำนวนผู้ติดเชื้อที่อยู่ข้างเคียง (Number of infected neighbours)

D = ความน่าจะเป็นของการตาย (Probability of dead)

Q = ความน่าจะเป็นของการรักษาหายแล้วพัฒนาภูมิต้านทาน (Probability of developing immune)

R_n = จำนวนตัวเลขสุ่ม (Random number)

T = เวลา ในที่นี้คือจำนวนวัน (Time)

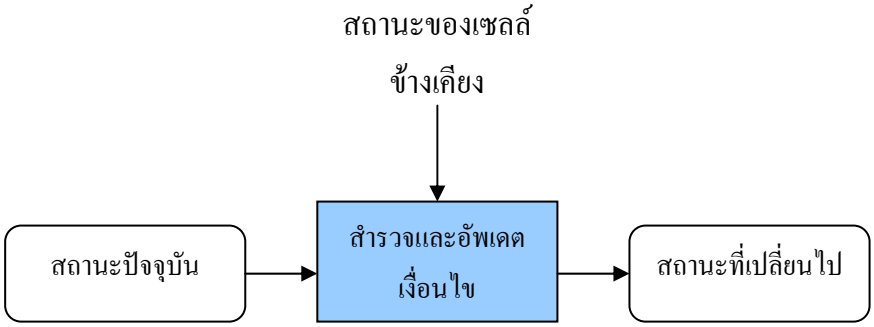
สาเหตุที่มีการกำหนดค่าตัวเลขให้แต่ละเซลล์เพราะตัวเลขเหล่านี้จะแทนค่าแต่ละเซลล์ที่กำหนดไว้และจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนสถานะจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งก็ด้วยการเปลี่ยนตัวเลขตามเลขสุ่ม (Random number) ด้วยเงื่อนไขความน่าจะเป็นที่เราได้กำหนดไว้

3.3 เงื่อนไขของแบบจำลอง (Model Conditions)

- เงื่อนไขที่หนึ่ง เงื่อนไขของการเปลี่ยนจาก Susceptible ไปเป็น Exposed คือ

$$R_1 > (1\text{-}P)^C$$

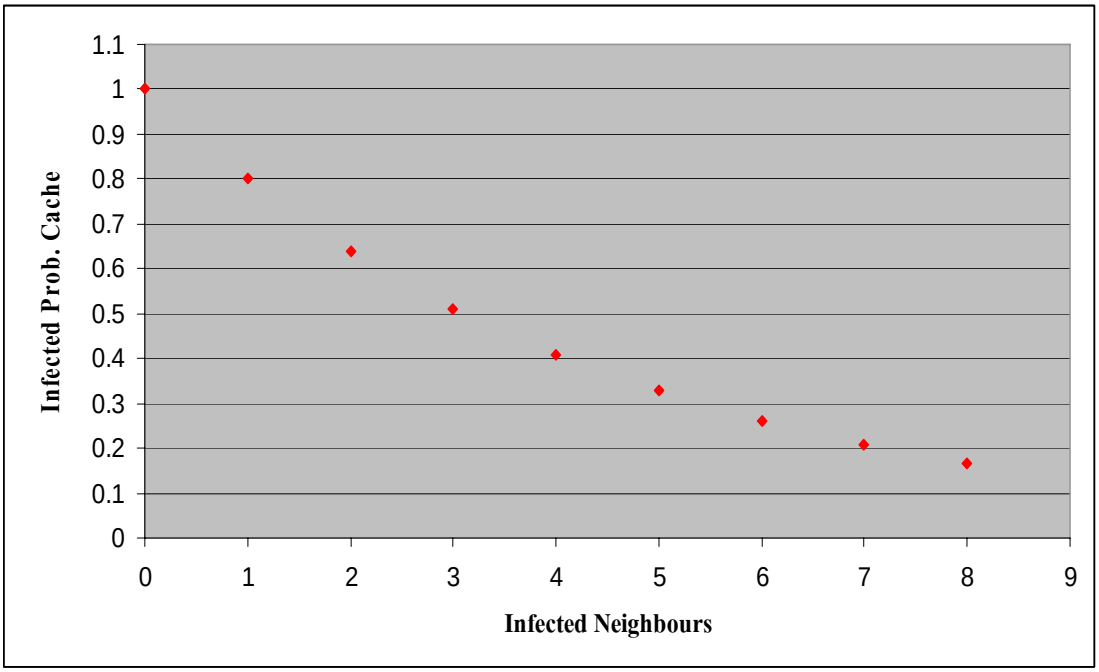
โดย R_1 คือ จำนวนเลขสุ่มครั้งที่หนึ่ง และ $(1\text{-}P)^C$ เรียกว่า Infected Probability Cache เป็นเงื่อนไขที่ต้องมีการสำรวจเซลล์ข้างเคียงก่อนเสมอซึ่งคือ C สมมติให้ P=0.2



รูปแสดงการเปลี่ยนสถานะที่ขึ้นกับเซลล์ข้างเคียง

Infected Neighbours (C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Infected Prob. Cache	1.00	0.80	0.64	0.51	0.41	0.33	0.26	0.21	0.17

ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์ของ Infected Neighbours กับ Infected Probability Cache



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Infected Probability Cache กับ Infected Neighbours

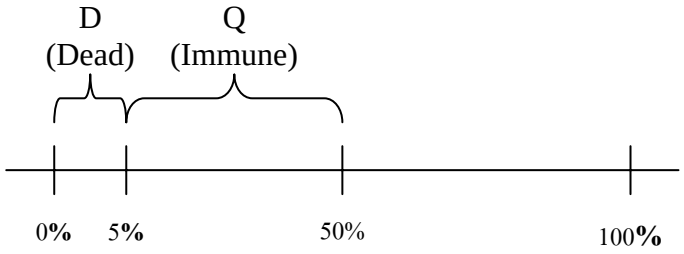
เมื่อนำค่าที่ได้มาวาดกราฟจะพบว่าค่า Infected Probability Cache มีค่าที่ลดลงเรื่อยๆ เป็นไปตามจำนวน Infected Neighbours (C) ที่เพิ่มมากขึ้น ค่า Infected Probability Cache ก็จะยิ่งน้อยลง ทำให้เกิดช่วงกว้างมากขึ้นที่จะสุ่มให้เป็น Exposed ได้ง่าย เปรียบเสมือนว่าประชากรหนึ่งที่มีประชากรรอบๆตัวเป็นโรคไข้หวัดใหญ่หลายคนก็จะทำให้ประชากรนั้นมีโอกาสติดโรคไข้หวัดใหญ่ได้มากขึ้นตามจำนวนประชากรที่ติดโรคเพิ่มขึ้น

- เงื่อนไขที่สองเงื่อนไขของการเปลี่ยนจาก Infected ไปเป็น Dead หรือ Immune คือ

$R_2 < D$ (ความน่าจะเป็นของการตาย) และ

$D < R_2 < Q$ (ความน่าจะเป็นของการรักษาหายแล้วพัฒนาภูมิต้านทาน)

โดย R_2 คือจำนวนเลขสุ่มครั้งที่สอง ความหมายของเงื่อนไขนี้คือ เมื่อทำการสุ่มตัวเลขออกมาแล้วน้อยกว่า D ประชากรที่เป็น Infected ก็จะกลายเป็น Dead อีกเงื่อนไขหนึ่งคือ เมื่อทำการสุ่มตัวเลขออกมาแล้วมากกว่า D แต่น้อยกว่า Q ประชากรที่เป็น Infected ก็จะกลายเป็น Immune แต่ในกรณีที่ทำการสุ่มตัวเลขออกมาแล้วแต่ไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขของ Dead หรือ Immune ประชากรนั้นก็ยังคงเป็น Infected อยู่เหมือนเดิมต่อไป



รูปแสดงช่วงของเงื่อนไขความน่าจะเป็นของการตายและความน่าจะเป็น

ของการรักษาหายแล้วพัฒนาภูมิต้านทาน

3.4 ภาพรวมของโครงสร้างโปรแกรม (Overall Structure)

- การทำงานของโปรแกรม

1. รับข้อมูลและค่าต่างๆของตัวแปรจากการกำหนดเริ่มต้น
2. ทำการประมวลผลแต่ละขั้นตอนตามเงื่อนไขของโปรแกรม
    2.1 ทำการนับจำนวนเซลล์ที่ติดเชื้อโดยรอบของแต่ละเซลล์
    2.2 ทำการเช็คสถานะของเซลล์หลักที่จะเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากเซลล์โดยรอบที่ติดเชื้อ
    2.3 ทำการแยกกรณีคิด ตามแต่ละกรณีของเซลล์ที่เป็นอยู่
    2.4 ทำการแสดงผลลัพธ์ออกมาและวนลูปประมวลผลจนจบเงื่อนไข
3. จบการประมวลผล

- การทำงานของการแสดงผล

1. เก็บข้อมูลที่ประมวลผลจนครบในแต่ละรอบ
2. นำข้อมูลมาเขียนแสดงผล
3. แสดงชื่อหัวข้อ พร้อมทั้งแสดงข้อมูลแต่ละรอบที่ประมวลผลเสร็จ

4. ผลการทดลอง (Simulation Results)

4.1 การกำหนดเซลล์ (Cells setting)

ในการทดลองเราออกแบบเซลล์แทนด้วยสีต่างๆก่อนจะทำการทดลองดังนี้

- เซลล์สีเขียวแทนด้วย Susceptible cell
- เซลล์สีชมพูแทนด้วย Expose Cell
- เซลล์สีแดงแทนด้วย Infected Cell
- เซลล์สีดำแทนด้วย Immune Cell
- เซลล์สีน้ำเงินแทนด้วย Dead Cell

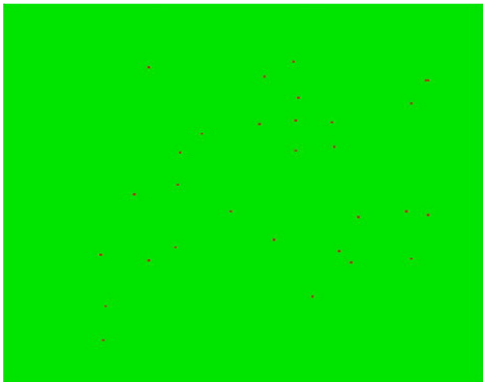
4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameters setting)

ก่อนจะทำการรันโปรแกรมจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรมเสมอ ในที่นี้เป็นตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางข้างล่าง

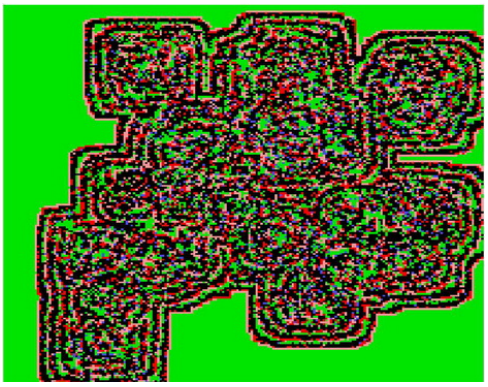
ค่าพารามิเตอร์	ปริมาณ
ขนาดแลตทิซ NxN	200
P (ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ)	0.660
Q (ความน่าจะเป็นของการรักษาหายแล้วพัฒนาภูมิต้านทาน)	0.520
D (ความน่าจะเป็นของการตาย)	0.007
จำนวนวันที่นับ	200
จำนวนผู้ติดเชื้อที่กำหนดเริ่มต้น	30

ตารางแสดงปริมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองโปรแกรม

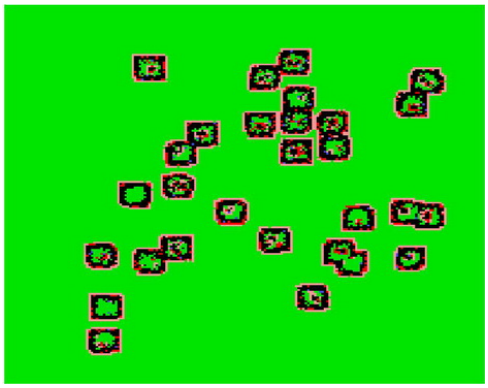
4.3 การแสดงผลโปรแกรม (Display Program Results)



Days 0

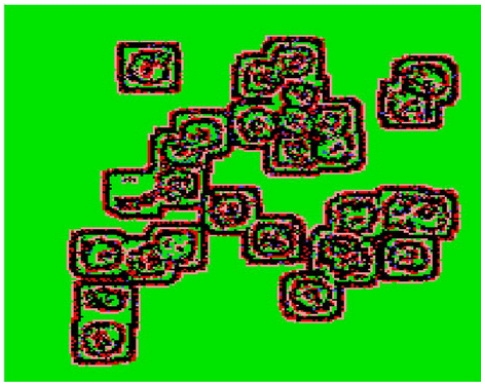


Day 80

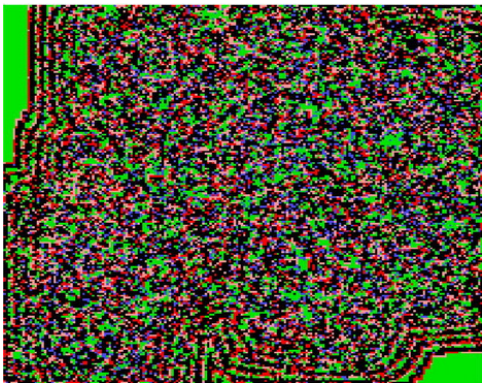


Days 20

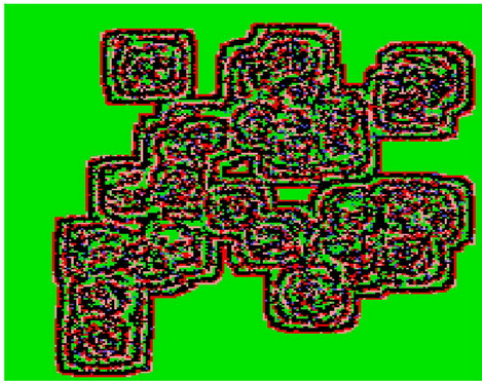
Day 100



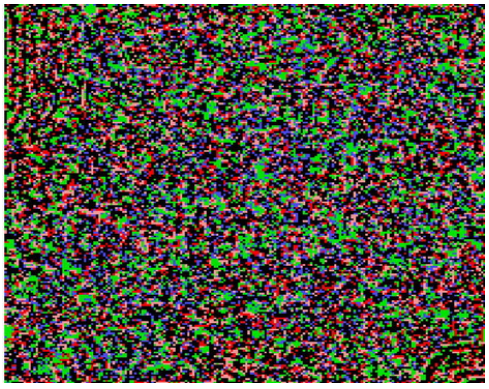
Days 40



Day 150

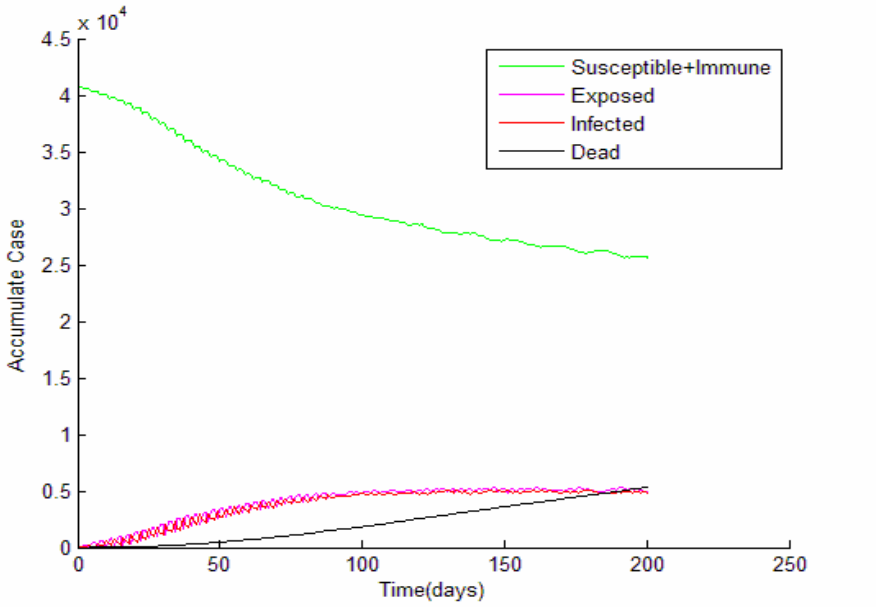


Days 60



Day 200

จากภาพการแสดงผลเริ่มที่วันที่ 0 (วันกำหนดเริ่มต้น) มีประชากรผู้ป่วยโรคไข้หวัดใหญ่กระจายอยู่ทั้งสิ้น 30 คน เมื่อเวลาผ่านไปประชากรเหล่านั้นก็มีการแพร่กระจายโรคติดต่อไปยังประชากรปกติที่เสี่ยงติดเชื้อ การติดเชื้อมีการแพร่กระจายไปอย่างรวดเร็ว ดังที่เห็นในรูปประกอบไปด้วยวันที่ 0 20 40 60 80 100 150 และ 200 ตามลำดับ



กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประชากรแต่ละประเภทเทียบกับเวลาที่ผ่านไป 200 วัน เฉลี่ย 10 ครั้ง

เมื่อทำการรันโปรแกรมจนเสร็จก็จะทำการนับจำนวนประชากรแต่ละเซลล์และนำมาวาดกราฟแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจนถึงวันที่ 200 พบว่าจำนวนประชากรปกติและประชากรที่มีภูมิคุ้มกันมีแนวโน้มลดลงจนเกือบจะคงที่ ประชากรที่ได้รับเชื้อและประชากรที่ติดเชื้อก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นน้อยๆจนเกือบจะคงที่ และประชากรที่เสียชีวิตก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

Case / Days	วันที่ 0	วันที่ 40	วันที่ 80	วันที่ 120	วันที่ 160	วันที่ 200
Susceptible และ Immune	39970	34584	30145	28068	25633	24713
Exposed และ Infected	30	5114	8567	10169	10407	9943
Dead	0	302	1288	2567	3960	5344

ตารางแสดงจำนวนประชากรแต่ละประเภท ณ ช่วงเวลาต่างๆ

5. การอภิปรายและการสรุปผล (Discussion and conclusion)

การจำลองแบบการแพร่ระบาดด้วยวิธี Cellular Automata นี้เป็นการแสดงสาธิตการระบาดในอีกรูปแบบหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมหลายๆอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปของประชากรในระนาบสองมิติ เช่น พฤติกรรมการติดเชื้อหรือจะเป็นการแพร่ระบาดกระจายออกไปเป็นวงกว้างเป็นต้น ในส่วนของโปรแกรมนั้นก็ถูกออกแบบมาให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ แต่ทั้งนี้การใส่ค่าพารามิเตอร์ก็ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการประมวลผลของโปรแกรมให้แสดงถึงพฤติกรรม

สิ่งหนึ่งที่สำคัญของแบบจำลอง Stochastic คือเป็นทางเลือกที่ดีของการอธิบายวิทยาการระบาดในระดับขนาดเล็ก ทำให้เห็นในสิ่งที่แตกต่างกันออกไปทั้งในเรื่องของโอกาสและความน่าบนพื้นฐานของเวลา ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ได้เท่ากันสม่ำเสมอจึงมักจะมีการทำการประมวลผลหลายๆครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะแตกต่างกับแบบจำลอง Deterministic ที่เป็นสมการอนุพันธ์ที่ให้ผลลัพธ์แบบแม่นตรงเท่ากันทุกครั้งที่หาคำตอบ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

1. A. Hawkins, D. Roff and A. Gundry. Cellular Automata and Spatial Epidemics, 25 November 2001
2. G. Ch. Sirakoulis, I. Karafyllidis, A. Thanailakis. A Cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation, accepted 12 April 2000
3. S. Chang, Cellular Automata Model for Epidemics, UC Davis Physics
4. M. Schwehm, H. P. Duerr and M.Eichner, Network Models for influenza transmission and control, University of Tubingen, Department of Medical Biometry,2009
5. S. C. Fu and G. Milne, Epidemic Modelling Using Cellular Automata, The University of Western Australia, Faculty of Engineering,2009
6. http://vlab.infotech.monash.edu.au/simulations/cellular-automata/epidemic accessed on 23 October 2009