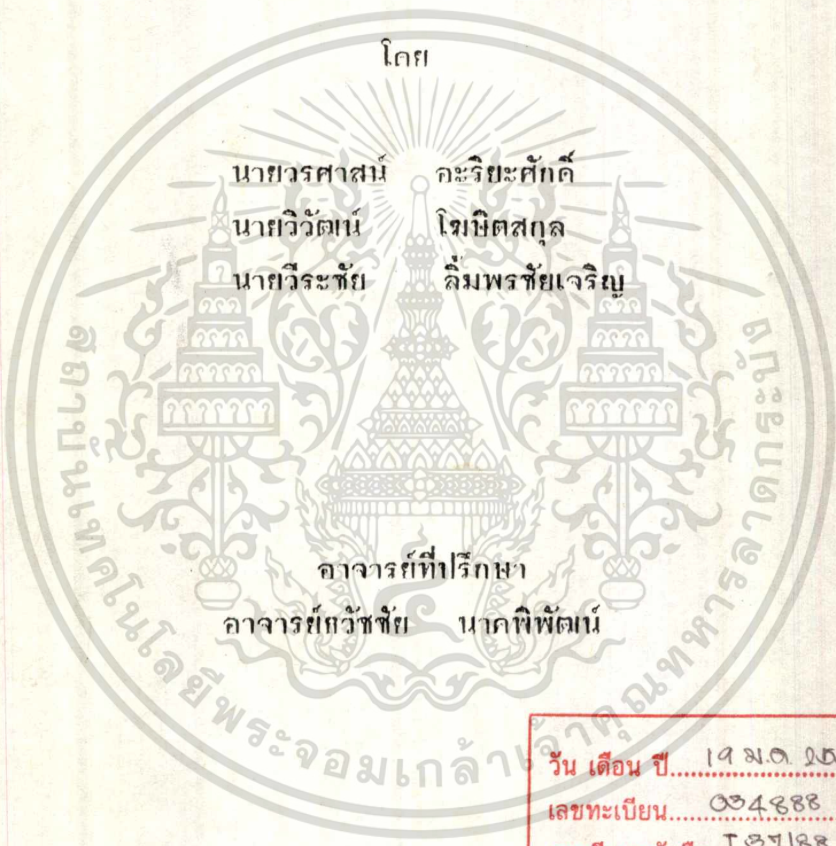




การวิเคราะห์การไหลภายในเครื่องยนต์ 2 จังหวะ
 FLOW VISUALIZATION IN TWO STROKE ENGINE



วัน เดือน ปี..... 19 ม.ค. 2537
 เลขทะเบียน..... 034888
 เลขเรียกหนังสือ..... T 37188 ๑4

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีการศึกษา 2537

ปีการศึกษา 2537

การวิเคราะห์การไหลภายในเครื่องยนต์ 2 จังหวะ



(Handwritten signature)

(อาจารย์ธวัชชัย นาคพิพัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การไหลภายในเครื่องยนต์ 2 จังหวะ

วรศาสตร์ อริยะศักดิ์

วิวัฒน์ ไชยิตสกุล

วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ

อาจารย์รัชชัย นาคพิพัฒน์ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

บทคัดย่อ

การไหลของแก๊สในกระบอกสูบเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ลักษณะพฤติกรรมการไหลของอนุภาคภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ ในระหว่างช่วงของการดูดและการอัดของเครื่องยนต์ได้ถูกวัดโดยการผ่านกระบอกสูบใสการสังเกต การไหลใช้วิธีตามรอยอนุภาค (PIV, Particle Tracking Velocity) โดยปล่อยอนุภาคเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์พร้อมกับอากาศในจังหวะดูดแล้วถ่ายภาพการไหลของอนุภาคในจังหวะดูดและอัดด้วยกล้องวิดีโอและวัดความเร็วอนุภาคด้วย Fiber optic Laser velocimetry (FLV) แล้วนำภาพและความเร็วที่ได้มาวิเคราะห์ทิศทางการไหล และความเร็วของอนุภาคสามารถนำมาจำลอง และเขียนเป็น Velocity Profile ได้

Flow Visualization in two stroke engine

by

Mr.Worasard Ariyasak

Mr.Vivat Khositsakul

Mr.Weerachai Limpornchaicareung

Tawtchai Nakpipat (Advisor)

Abstract

Gas flow in combustion chamber has been thought to be important factors which affect combustion phenomena in an engine.

Flow characteristic of gas during suction and compression stroke in the cylinder of two stroke engine has been measured through transparent cylinder with flow visualization technic such as particle tracking velocimeter method by means of video camera and fiberoptic laser velocimeter. Obtained data were processed by personal computer and velocity pattern of the gas were shown as velocity contour in 3 dimension at any plane.

Effect of engine speed and port configuration on gas velocity swirl and tumble have been cleared.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
การไหลในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน	1
การเคลื่อนที่ของลูกสูบ	2
การไหลผ่าน cylinder-liner ports	3
ความเร็วเฉลี่ยและลักษณะของ TURBULENCE	5
การประยุกต์ใช้งานของ Engine velocity data	7
การศึกษานามการไหลในห้องเผาไหม้โดยวิธี Math Model	9
การเลียนแบบการไหลแบบ Turbulent ในห้องเผาไหม้ภายในด้วยวิธี Finite element method	10
Mathematical Formulations	10
Turbulence models	13
Calculation Conditions	15
การศึกษานามการไหลในห้องเผาไหม้โดยการทดลอง	17
(สำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ)	
อุปกรณ์การทดลอง	17
วิธีการทดลอง	22
รูปแสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัด	23
ตัวอย่างข้อมูลจากเครื่อง FLV	24
ตารางแสดงค่าขนาดอัตราเร็วที่วัดจากเครื่อง FLV	29
กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วเมื่อเทียบกับ crank angle ณ ตำแหน่งใด ๆ	35
รูป 3 มิติแสดงค่าขนาดความเร็วที่ plane ต่าง ๆ	43
วิเคราะห์ผลการทดลอง	54
วิเคราะห์ข้อผิดพลาดและปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง	55
สรุปผลการทดลอง	55
รายชื่อเอกสารอ้างอิง	57

การไหลภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน

(Fluid Motion within the cylinder of Internal Combustion Engine)

การไหลของแก๊สในห้องเผาไหม้ สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน นับว่าเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญที่สุด ของการควบคุมกระบวนการเผาไหม้ และยังเป็นตัวบ่งชี้ถึง ลักษณะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การผสมของเชื้อเพลิง-อากาศ การเคลื่อนที่ของเปลวไฟ และประสิทธิภาพที่จะได้รับ นอกจากนี้ยังครอบคลุมถึง heat transfer สู่ผนังกระบอกสูบ

ในการศึกษานามการไหลของแก๊สในกระบอกสูบ นับว่าเป็นเรื่องที่สำคัญมากเพราะลักษณะการไหล จะมีลักษณะเป็น turbulence , swirl , และ compressible โดยในปัจจุบันการศึกษานามการไหลสามารถแบ่งได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ

1. การศึกษาโดยพิจารณาจากผลการทดลอง ซึ่งวิธีที่นิยมทำกันก็คือวิธีสะกดรอยอนุภาค (PARTICIPLE TRACKING VELOCIMETRY) ซึ่งเป็นวิธีการวัดเวกเตอร์ความเร็วของการไหล ซึ่งจะได้ผลที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอื่นๆ แต่สำหรับการทำโปรเจกต์ครั้งนี้ จะใช้วิธีวัดด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งมีข้อเสียคือต้องวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของมุมข้อเหวี่ยงและค่าที่ได้ก็เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งทำให้ไม่ทราบถึง ทิศทางการหมุนวน ดังนั้นเพื่อให้เนื้อหากการวิเคราะห์ถูกต้องยิ่งขึ้น เราจึงมีการถ่ายภาพลักษณะการไหลด้วยกล้องวีดีโอ เพื่อประกอบการพิจารณาด้วย
2. การศึกษาโดยใช้ Math Model เป็นการศึกษาลักษณะการไหลโดยใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติของ Fluid Dynamic ประกอบกับ Thermodynamic ส่วนวิธีการวิเคราะห์จะมีความถูกต้องมาก-น้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับวิธี และเงื่อนไขขอบเขตที่นิยมใช้ก็มีวิธี Numerical Method ซึ่งจะขอกล่าวถึงในภายหลัง

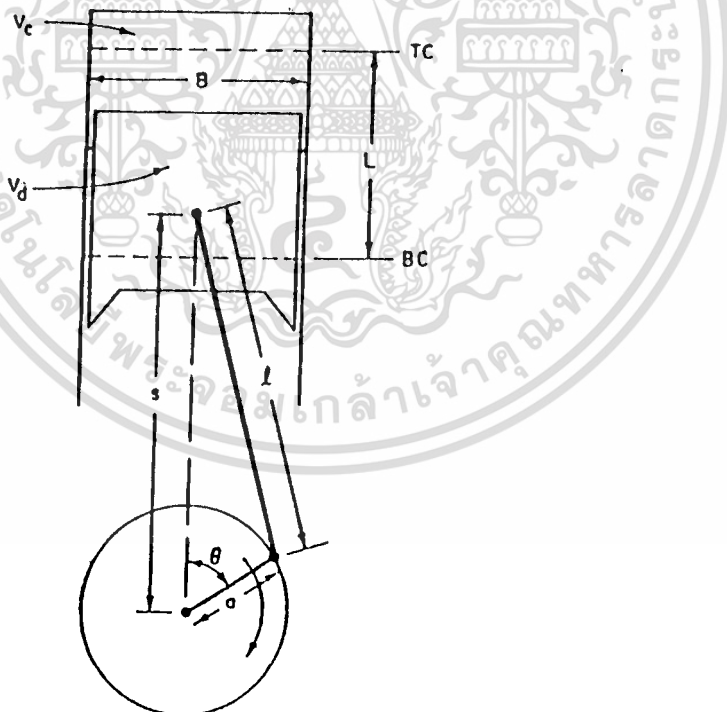
สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลในห้องเผาไหม้ เราจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องยนต์ , Fluid Dynamic , ลักษณะการไหลแบบ turbulence การหมุนวนเพราะสิ่งเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อสนามการไหล

การเคลื่อนที่ของลูกสูบ

เป็นปัจจัยตำแหน่งเพราะเป็นตัวช่วยในการดูอากาศและอัดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยเราพบว่า การออกแบบลูกสูบที่ดีจะส่งผลต่อการเผาไหม้ด้วย และได้ความสัมพันธ์ของลูกสูบ กับ crank angle คือ ดังนี้

$$\frac{S_p}{S_p} = \frac{\pi}{2} \times \sin \theta \left[1 + \frac{\cos \theta}{(R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right]$$

โดยที่ S_p คือ อัตราความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ มีค่าเท่ากับ $2LN$
 N คือ ความเร็วรอบของ crankshaft (rev/s)
 R คือ อัตราส่วน l/a
 L, l และ a เป็นค่าที่แสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของลูกสูบ

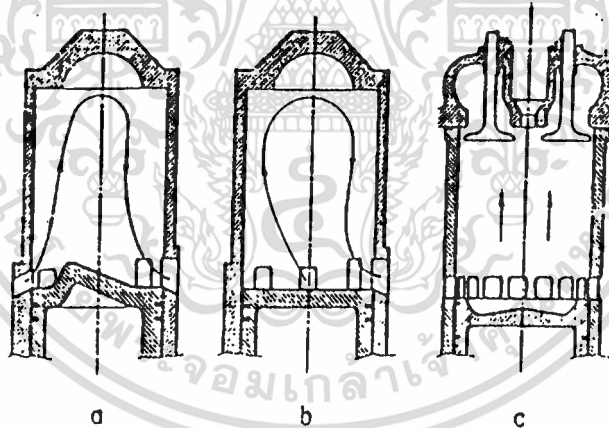
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลผ่าน Cylinder - Liner Ports

การจะพิจารณาลักษณะของการไหลผ่าน Ports ของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ เพื่อการ Scavenging Process (เป็นกระบวนการเพื่อรับไอดี และได้ออกเสีย) เราอาจแยกได้จากการจัดเรียงตัวของ Ports ดังรูปที่ 2 และ 3

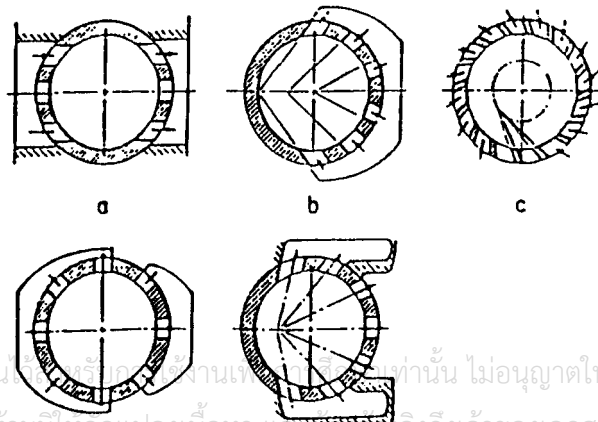
ตำแหน่ง ลักษณะของ Ports เป็นตัวควบคุมกระบวนการ Scavenging โดยระบบแบบ Cross และ Loop Scavenging เราจะใช้ Exhaust และ inlet ports อยู่บนผนังกระบอกสูบ และมีลูกสูบเป็นตัวปิด - เปิด ส่วนระบบแบบ Uniflow จะ Inlet ports และ exhaust valves (ตรงฝาสูบ) หรือ ใช้ Inlet และ exhaust ports with opposed pistons

แม้ว่ารูปแบบที่ได้จะต่าง ๆ กันไปตามรูปร่างของ ports แต่ก็จะมีหลักในการทำงานคล้าย ๆ กัน และจากการทดลองพบว่า ลักษณะของ port ที่ให้ค่าที่คิดที่สุดควรจะเป็นรูป Rectangular ports ดังรูป 4 รูปที่ 5 จะแสดงให้เห็นถึง รูปร่างของ port 8 ต่อผลของการไหลเข้าสู่กระบอกสูบ



Cross-scavenged (A), loop-scavenged (B), and uniflow-scavenged (C) two-stroke cycle flow configurations

รูปที่ 2



Common porting arrangements that go with cross-scavenged (A), loop-scavenged (B), and uniflow-scavenged (C) configurations

ความเร็วเฉลี่ยและลักษณะของ TURBULENT

การไหลแบบ turbulent ในกระบอกสูบเป็นผลจาก fluctuation ในการไหล (การสั่นของโมเลกุลในการไหล ทำให้ความเร็วของการไหลมีลักษณะสูง ๆ ต่ำ ๆ มีลักษณะเป็นการไหลแปรปรวน) ซึ่ง fluctuation จะทำให้การถ่ายเทโมเมนตัม การถ่ายเทความร้อน และการแพร่กระจายของโมเลกุลมีอัตราที่สูงขึ้น การไหลแบบ Turbulent, จึงทำให้อัตราการผสม อากาศกับเชื้อเพลิงดีขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงขึ้นด้วย Viscous shear stress เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานในของไหล และทำให้พลังงานในของไหล และทำให้พลังงานภายในของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทำให้เกิดการไหลแบบ turbulent แหล่งพลังงานสำหรับการเกิด Turbulent แหล่งพลังงานสำหรับการเกิด turbulent คือแรงเฉือนในความเร็วเฉลี่ย

TURBULENT มีลักษณะการไหลทั้งแบบ SWIRL และการไหลแบบความเร็วแกว่ง fluctuation ลักษณะการไหลแบบ turbulent จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในห้องเผาไหม้ การไหลจะมีความเกี่ยวข้องกับ Turbulent shear layer, recirculating region และ Boundary layer การไหลของแก๊สในห้องเผาไหม้จะไม่คงที่ และ จะแสดงลักษณะ ของ fluctuation ในแต่ละรอบการทำงานของเครื่องยนต์ ทั้งลักษณะทั่วไปและรายละเอียดของการไหลแบบ turbulent ต่างก็เป็น factor ที่สำคัญต่อพฤติกรรมของการไหล

ลักษณะที่สำคัญของ Turbulent คือความไม่เป็นรูปแบบหรือการไหลแบบ Random ดังนั้นวิธีทางสถิติจึงเป็นวิธีที่ใช้ในการหาปริมาณต่าง ๆ เกี่ยวกับการไหล ในการไหลแบบ Turbulent ที่ steady state ความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของของไหล U สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$U(t) = \bar{U} + u(t)$$

สำหรับ steady flow \bar{U} คือความเร็วเฉลี่ย เท่ากับค่าเฉลี่ยของ $U(t)$

$$\bar{U} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U(t) dt$$

turbulent intensity u' คือ root mean square ของ u

$$u' = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u^2 dt \right)^{1/2}$$

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของ $uU = 0$

ในแต่ละ cycle ของการทำงานของเครื่องยนต์ ลักษณะทั่วไปของการไหลยังคงเหมือนเดิม แต่รายละเอียดของการไหลจะเปลี่ยนไป เนื่องจากความเร็วเฉลี่ยในการไหลแต่ละ cycle ไม่เท่ากัน ดังนั้น เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จึงควรทำการวัดค่าต่าง ๆ ในหลาย ๆ cycle ของการทำงานของเครื่องยนต์ และค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดเรียกว่า crank angle ที่ i สามารถเขียนได้ ดังนี้

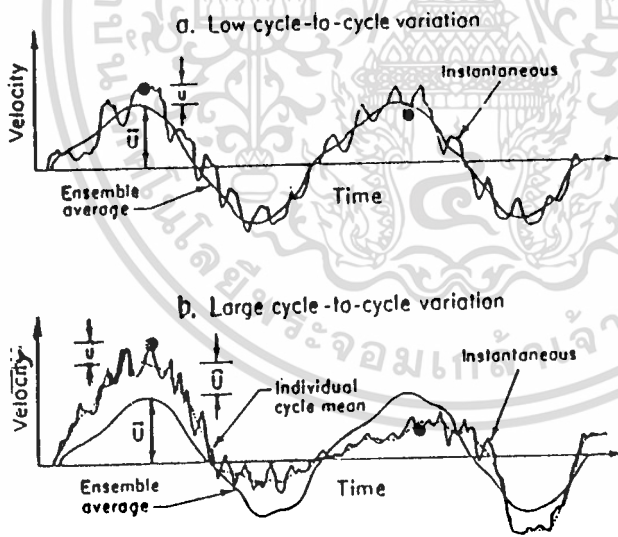
$$U(\theta, i) = \bar{U}(\theta, i) + u(\theta, i)$$

Ensemble averaged velocity

หาได้ดังสมการ

$$\bar{U}_{E1}(\theta) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} U(\theta, i)$$

เมื่อ N_c คือ จำนวน cycle สำหรับการวัดข้อมูลทั้งหมด



รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วกับ CRANK ANGLE ต่าง ๆ

การประยุกต์ใช้งานของ Engine velocity data

ตามที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ในการสังเกตการณ์ไหลจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ความเร็วในแต่ละ cycle รวมทั้งการใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด ensemble averaged velocity U_{EA} กำหนดได้โดยสมการ

$$U_{EA} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} U(\theta, i)$$

และ ensemble average fluctuation intensity มาได้จากสมการ

$$u'_{r,EA}(\theta) = \left[\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} (u(\theta, i))^2 \right]^{1/2}$$

สมการทั้งสองนี้จำเป็นต้องใช้ค่า U และ u และ u' ที่แต่ละ crank angle ในการพิจารณา วิธีการวัดความเร็วที่วิธีหนึ่ง คือ laser doppler anemometry (LDA) เป็นการการใช้ลำแสง laser 2 ลำแสงตัดกันที่ปริมาตรเล็กๆปริมาตรหนึ่ง เมื่ออนุภาคเล็กผ่านปริมาตรนั้นมันจะกระจายแสงที่ความถี่หนึ่งขึ้นกับความเร็วของอนุภาค อนุภาคที่ป้อนเข้าไปนั้นจะต้องเล็กพอที่จะไหลโดยปราศจากการ slip สัญญาณจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านจุดที่จะทำการวัดเท่านั้นดังนั้นข้อมูลที่วัดได้ ข้อมูลหนึ่งจึงเป็นความเร็วที่อยู่ในระหว่าง crank angle คู่หนึ่งให้มีความกว้างเท่ากันและมีจุดกึ่งกลางความกว้างมุมที่ เรียกว่า specific crank angle ฉะนั้นในการหา ensemble averaged specific velocity จึง ครอบคลุมอยู่ที่ช่วง crank angle หนึ่งที่มีความกว้าง ที่ specific crank angle สมการ ensemble averaged velocity จึงแสดงได้ ดังนี้

$$U_{EA}(\theta) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_i} U_{i,j}(\theta \pm \frac{\Delta\theta}{2})$$

เมื่อ N_i คือ จำนวนข้อมูลที่ถูกบันทึกใน windows ระหว่าง cycle ที่ i

N_c คือ จำนวน cycle

N_t คือ จำนวนข้อมูลที่ทำการวัด

เช่นเดียวกันสำหรับ ensemble root mean square velocity fluctuation คือ

$$u'_{r,EA}(\theta) = \left[\frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_i} [u_{i,j}(\theta \pm \frac{\Delta\theta}{2})]^2 \right]^{1/2}$$

ซึ่ง $U_{i,j} = U_{ij} - U_{EA}$

ซึ่ง

$$u_{i,j} = U_{i,j} - \bar{U}_{EA}$$

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงขอบเขตการไหลอย่างสมบูรณ์แบบ จึงจำเป็นที่จะต้อง หาความเร็วเฉลี่ย และความเร็ว fluctuation ในแต่ละ cycle ส่วนที่สำคัญที่สุด ของกระบวนการนี้ คือ การกำหนดความเร็วเฉลี่ยที่ specific crank angle ในแต่ละ cycle ยกตัวอย่างเช่น การ move window , low pass filter และ smoothing เป็นต้น

ในการวิเคราะห์ความเร็วที่แต่ละ cycle ขั้นแรกจะต้องหา mean velocity และ ค่าเฉลี่ย ensemble ของความเร็วเฉลี่ย คือ

$$\bar{U}_{EA}(\theta) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \bar{U}\left(\theta \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i\right)$$

ซึ่งสมการนี้เหมือนกับค่าเฉลี่ย ensemble ตามสมการ root mean fluctuation mean velocity ในแต่ละ cycle สามารถหาได้จาก

$$U_{RMS}(\theta) = \left[\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \left[\bar{U}\left(\theta \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i\right) - \bar{U}_{EA}(\theta) \right]^2 \right]^{1/2}$$

สมการนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของ fluctuation ขณะใดขณะหนึ่งในความเร็วเฉลี่ย ในช่วงความกว้าง crank angle ที่ specific crank angle หาได้จากสมการ เนื่องจากความเร็ว fluctuation ขณะใดขณะหนึ่ง ไม่คงที่ในแต่ละ cycle และจำนวนข้อมูลไม่เพียงพอที่จะเชื่อถือได้ จึงต้องทำการเฉลี่ยค่าความเร็ว

$$u'_{T,EA}(\theta) = \left[\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \left[U\left(\theta \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i\right) - \bar{U}\left(\theta \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i\right) \right]^2 \right]^{1/2}$$

ค่า $u'_{T,EA}$ คือ ensemble-averaged turbulence intensity เทคนิคต่าง ๆ

ได้ถูกใช้ในการวัดความเร็วของก๊าซในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ เทคนิคหนึ่งที่ให้ข้อมูล สมบูรณ์ และแม่นยำ คือ laser doppler anemometry ผลของการทดสอบด้วยเทคนิคนี้ แสดงให้เห็นถึงลักษณะสำคัญของการไหลของก๊าซในกระบอกสูบ ข้อมูลที่นำมาได้จะต้องนำมา วิเคราะห์ด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากข้อมูลนี้ได้มาจากเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาพิเศษ ซึ่งรูปแบบและของไหลได้ถูกดัดแปลงเพื่อทำการทดลองและการอธิบายที่ง่ายด้วย การไหล ในกระบอกสูบ เป็น 3 มิติจึงจำเป็นต้องทำการวัดการไหลหลายจุด ๆ ในกระบอกสูบและใช้เทคนิค flow visualization ในการแสดงลักษณะการไหลได้อย่างเพียงพอ



การศึกษานามการไหลในห้องเผาไหม้โดยใช้ Math Model

การศึกษาการไหลโดยใช้ Numerical Method มีหลายวิธี เช่น Finite Different method , Controlled volume , Finite element Method แต่วิธีที่นิยมและสามารถครอบคลุม Boundary Condition ได้ดีที่สุด คือ Finite element Method Simulation of the Turbulence Flow inside the combustion chamber of a Reciprocating Engine with a Finite element Method

ในการหาสมการลักษณะการไหลแบบ turbulent โดยใช้วิธี numerical simulation ในจังหวะดูด และ จังหวะอัด เราต้องอาศัยการแก้สมการ Favre average Navier-Stokes equation. และ k-E turbulence model โดยใช้ Finite dependent semi-implicit schme และ Finite element method with moving mesh

การเลียนแบบการไหลแบบ turbulent ในห้องเผาไหม้ภายในด้วยวิธี Finite element Method

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการเลียนแบบการไหลแบบ turbulent ด้วยวิธี numerical ในระหว่างการดูด และการอัดของเครื่องยนต์. สมการ Navier-Stokes ได้ถูก solved ด้วย k-E turbulence model. วิธี Numerical ใช้หลักการที่ว่าใช้ วิธี semi-implicit แบบเวลาไม่อิสระและวิธี finite element method ด้วยการเคลื่อนที่ของ mesh ผลลัพธ์ของการคำนวณแบบ 2 มิติ แบบมีและไม่มี swirl ได้ถูกกล่าวถึง และเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง อิทธิพลของ ผลแตกต่างจากการไหลแบบ turbulence และ การเลียนแบบการไหลโดยวิธี numerical จะถูกกล่าวถึงด้วย

การไหลภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในนั้นไม่หยุดนิ่ง (มีการ เคลื่อนที่) , อัดตัวได้ , และปั่นป่วน พฤติกรรมของการไหลเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดสำหรับควบคุมกระบวนการเผาไหม้ และ สมรรถภาพของเครื่องยนต์ เพราะฉะนั้น ในการออกแบบเครื่องยนต์สมัยใหม่ , การทำนายสภาพการไหลเข้าจึงควรพิจารณาอย่างละเอียด. ในช่วงระยะเวลา 10 ปี วิธีทาง numerical ในระบบ multi dimension (หลายมิติ) ได้ถูกพัฒนา. จากการค้นพบนี้ทำให้เกิดข้อเสนอแนะที่สำคัญ สำหรับโครงสร้างการไหลในกระบอกสูบ ระหว่างจังหวะการดูดและอัด , และไม่มี การไหลเข้าแบบ swirl โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ใช้หลักพื้นฐานของ finite difference หรือ finite volume และ 2 สมการของ K-E ใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองการไหลปั่นป่วน

ในการไหลภายในกระบอกสูบขึ้นอยู่กับด้านเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ และ ระบบทางเข้า รูปร่างของห้องเผาไหม้ และ โครงสร้างของระบบการไหลเข้า ซึ่งปกติจะยุ่งยากซับซ้อน เพราะฉะนั้น การเคลื่อนที่ของลูกสูบและวาล์วในขอบเขตของการคำนวณเพราะฉะนั้นการจำลองทาง numerical โดยหลักของ finite difference หรือ finite volume ปกติจึงไม่ได้รวมถึงระบบการไหลเข้าและวาล์วในขอบ เขตของการคำนวณเพราะใช้การสร้าง mesh เช่นเดียวกัน ข้อสมมุติฐาน หรือ ผลของการ

ทดลองที่ต้องใช้ที่ช่องทางเข้าของกระบอกสูบเสมือนเป็นเงื่อนไขขอบเขตของทางเข้า ซึ่งเป็นไปได้สำหรับการคำนวณการไหลในกระบอกสูบ แต่ผลลัพธ์อาจจะไม่สมบูรณ์ เหมือนกับผลจากการทดลอง

ในการทำงานปัจจุบัน วิธี finite element ด้วยการใช้ unmesh วิธีนี้สามารถปรับตัวได้ดีสำหรับการคำนวณ fluid dynamic (CFD) ในขอบเขตที่ซับซ้อน และเงื่อนไขขอบเขตง่ายต่อการประยุกต์ใช้ประโยชน์ (เนื้อหาและวิธีที่เกี่ยวกับการคำนวณสามารถดูได้จาก appendix ท้ายเล่ม) ขอบเขตของการคำนวณรวมถึงห้องเผาไหม้หลัก, ลูกสูบ, วาล์วศูนย์กลาง และระบบการไหลเข้า เท่าที่เรารู้ มีคือข้อประยุกต์หนึ่งในข้อแรกของวิธี finite element ของการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในกระบอกสูบ

2 ขอบเขตที่ขยายออกของแบบ k-E ได้ถูกใช้ : Watkin's model และ Morel's model เราได้เปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลระหว่างจังหวะของการอัด และการคายเดาที่เหมือนกันที่ได้รับจากทั้ง 2 Model ซึ่งเป็นผลที่เห็นด้วยกับผลที่รายงานโดย B.A. Belfui และ A.D. Gosman ซึ่งใช้วิธี 3 วิธีแบบ k-E (Watkins, Morel, El Tahry) ปัจจุบันไม่มี model อันไหนที่จะสามารถเรียกได้ว่าดีเหนือกว่าอันอื่น ความแตกต่างเพียงอย่างเดียวระหว่าง model ต่าง ๆ คือการปรับเปลี่ยนในเทอมต่าง ๆ ของสมการการส่งค่า E เพื่อที่จะทำการคิดค่าของผลกระทบจากการอัดตัวแบบปั่นป่วนถึงแม้ว่าภายใน model เหล่านี้จะแสดงถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ในเงื่อนไขพิเศษต่าง ๆ ของการอัด, การขยาย ของการไหลแบบปั่นป่วนชนิดเดียวกัน, มันปรากฏว่าการปรับปรุงไม่ได้เปลี่ยนแบบปั่นป่วนของ K-E เลย

Mathematical Formulations

สมการการไหลในกระบอกสูบก็คือสมการ Navier-Stokes k-E turbulence ใช้เพื่อแยกเป็นตัวอย่างของการไหลในพื้นที่เล็ก ๆ การเพิ่มของเทอม, เหมาะสมสำหรับ statistical average ถูกใช้เป็นแบบในแนวคิดความหนืดแบบหมุนวน เราจึงต้องแก้ปัญหา density-weighted ensemble-average ของ

สมการ Navier-stroke พร้อม ๆ กับสมการ transport สำหรับ turbulence kinetic energy(k) และอัตราการกระจาย (E)

สมการไร้มิติสำหรับปริมาณเฉลี่ย คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2 \left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_t} \right) S_{ij} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho T u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{Re Pr} + \frac{1}{Re_t Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

โดยที่ $\rho(x,t)$ คือ ความหนาแน่น

$P(t)$ คือ ความดันเฉลี่ยทาง Thermodynamics

$T(x,t)$ คือ อุณหภูมิ

$u_i(x,t)$ และ x_j คือ ความเร็วในทิศทาง i

และคู่อันดับและตัวแปรไร้มิติ

$\pi(x,t)$ คือ normal stress นหารด้วย reference kinetic energy

ความดันรวม $P(x,t)$ สามารถจัดอยู่ในรูปของ

$$P(x,t) = P(t) + \gamma Ma_0^2 \left(\pi(x,t) - \frac{2}{3} \left[\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_t} \right) \mathcal{D} + \rho k \right] \right) \quad (4)$$

โดยที่ Ma_0 คือค่า Mach number และถือว่าการไหลเป็นแบบช้ากว่าเสียง

(subsonic) ($Ma_0 < 1$) การกระจายของ dynamic pressure ถูกตัดทิ้งใน

สมการพลังงาน

S_{ij} คือ strain rate tensor

\mathcal{D} คือ mean velocity divergence

แสดงได้โดย

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \text{ and } \mathcal{D} = S_{kk} = \frac{\partial u_k}{\partial x_k}$$

ค่า Reynolds number ของ turbulence สามารถแสดงในเทอมของรูปไร้มิติ k และ E คือ

$$\frac{1}{Re_t} = \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

โดยที่ μ_t คือ ค่าความหนืดไร้มิติแบบปั่นป่วน

C_μ คือ ค่าคงที่ = 0.09

Transport equation สำหรับ turbulent kinetic energy k และ ค่าอัตราการกระจาย E สามารถเขียนได้โดย

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} (\mu_t^2 + \rho k \mathcal{D}) - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \epsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + 2C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} C_1 \frac{\epsilon}{k} (\mu_t \mathcal{D}^2 + \rho k \mathcal{D}) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

model นี้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Launder และ Spalding ในปี 1974 เพื่อสำหรับแก้ปัญหาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ σ_k , σ_ϵ คือค่าคงที่ โดยที่

$$\sigma_k = 1 \text{ and } \sigma_\epsilon = 1.3.$$

ค่า μ (molecular viscosity) เป็น function ของค่าอุณหภูมิ T คือ

$$\mu = \mu_0 (1 + T)^\alpha \text{ with } \alpha = 0.8 \quad (7)$$

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของ model คือ

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Turbulence Models

ในการวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน k-E turbulence model ถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะมันง่ายและเป็นสมการหลักการทั่วไป ในช่วง 10 ปี แบบต่าง ๆ ของ k-E ได้ถูกพัฒนา สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้แบบปั่นป่วน ยกตัวอย่าง Gosman และ Watkins ได้เสนอสมการ E ซึ่งปรับปรุงแล้ว

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \epsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + 2C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} C_1 \frac{\epsilon}{k} (\mu_t \mathcal{D}^2 + \rho k \mathcal{D}) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \rho \epsilon \mathcal{D} \quad (8)$$

การเพิ่มเติม มาจากการสร้างแบบจำลองของ production term ในสมการ E transport สมการการไหลอัดตัวได้. อย่างไรก็ตาม Reynolds ก็ชี้ให้เห็นว่า การอัดตัวอย่างรวดเร็วแบบทรงกลมของการไหลแบบปั่นป่วนชนิดเดียวกัน การคาดเดาพฤติกรรมของอัตราส่วนที่ใหญ่ โดยใช้ model ที่กล่าวมาก่อนหน้า จะดูแล้วไม่น่าเป็นไปได้ Morel และ Mansour ได้เสนอ model แบบใหม่ซึ่งเพิ่มเงื่อนไขทั่วไปของการอัด ซึ่งรวมถึงการอัดแบบพื้นฐาน 3 แบบ คือ ทางแกน , ทรงกระบอก , ทรงกลม. เขาสมมุติว่า ระหว่างการอัดหรือขยายตัว การเปลี่ยนแปลงค่าของการอินทิเกรต L เป็นความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตร. หรืออาจกล่าวได้ว่า มวลการไหลของอนุภาคแบบปั่นป่วนคงที่ คือ

$$\rho L^n = \text{constant}, \quad (9)$$

โดยที่ ค่า $n = 1, 2, 3$ สำหรับการอัดพื้นฐานทั้ง 3 แบบตามลำดับ

$$L = \frac{k^{2/3}}{\epsilon} \quad (10)$$

สมการ modified E คือ

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \epsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + 2C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t \mathcal{D}^2 - \frac{2}{3} C_1 \rho \epsilon \mathcal{D} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \rho \epsilon \mathcal{D}$$

ค่า ส.ป.ส. C_1' และ C_2'' คือ

$$C_1' = C_1 + a^* (C_1 + 1.5), \quad C_2'' = 3 + \frac{3}{2n} \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (S₁₁ + S₂₂ + S₃₃) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (12) ราคา ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราได้สลาย viscous fluxes ลงไปเป็นส่วนของ $\alpha_w \nabla w$ และ residue $\mathcal{R}(\nabla w)$ เพื่อที่จะปรับปรุงให้วิธี numerical มีค่าคงที่ เทอมบางเทอมมัน จะถูกทำการด้วยวิธี implicit ในสมการ transport k และ E ค่าความเร็วตรงกับจุดต่าง ๆ ในขอบเขตที่เคลื่อนที่ สำหรับช่องว่างที่ต่อเนื่อง เราใช้วิธี finite element ด้วย P_1 / iso P_2 ซึ่งจะช่วยให้ต่อเนื่อง และสามารถ interpolate สำหรับค่าความดัน p , ความเร็ว u_j , อุณหภูมิ T, k, E

Calculating Conditions

รูปแบบทางเรขาคณิตของห้องเผาไหม้แสดงได้ตามรูปที่ 1 ขอบเขตของการคำนวณจะรวมถึงห้องเผาไหม้หลัก, ลูกสูบ, และระบบการไหลเข้า รูปแบบทางเรขาคณิตและเงื่อนไขขอบเขตถูกใช้ตรงกับห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งติดตั้งในห้อง Lab ทำงานที่ความเร็วรอบ 250 rpm และอัตราส่วนการอัด 16 ใช้ finite element mesh โดยมีจำนวน 2380 nodes และทำให้ละเอียดยิ่งขึ้นบริเวณใกล้ทางเข้าและทางออก

1. Boundary Conditions สำหรับผนังแข็งทั้งหมด wall function ถูกใช้ทำให้เกิดตัวแปรไม่อิสระบริเวณใกล้ผนัง เพื่อที่จะรวมการอัด ค่า molecular viscosity ซึ่งเป็น function ของอุณหภูมิ ถูกใช้เพื่อแสดงออกของกฎของกัมมา ด้วยค่า molecular viscosity คงที่ ค่าขอบเขตเงื่อนไขที่ผิวดูกวาดเคาที่ช่วงปลายของจังหวะอัด, ที่ทางเข้า, ค่า derivative ของความเร็วทางแกนและรัศมีถูกตั้งให้เป็น 0 ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิเดิมถูกกำหนดให้มีที่ส่วนทางเข้า. ค่า velocity fluctuation ที่ทางเข้าถูกทำให้เท่ากับ 10 % ของความเร็วทางแกนเฉลี่ย u_1

สำหรับการคำนวณแบบมีการไหลเข้าแบบ swirl, tangential velocity u_3 ถูกกำหนดให้มีที่ทางเข้าโดยเป็น function ของความเร็วทางแกน u_1

$$u_3 = 0.5 \cdot u_1$$

2. Initial Condition อากาศในห้องเผาไหม้ตอนแรกอยู่กับที่ ความดันเท่ากับ ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิถูกตั้งไว้ที่ 293 K. turbulence kinetic energy (พลังงานจลน์ปั่นป่วน) มีค่าเท่ากับ 1.1 % ของค่าพลังงานจลน์ที่ความเร็วเฉลี่ยลูกสูบเท่ากับ u_p^2 . นั่นก็หมายความว่า ค่า fluctuating velocity เท่ากับ 10 % ของความเร็วลูกสูบเฉลี่ย. ความยาวอัตราส่วน (length scale) ถูกประมาณไว้ที่ 10 % ของรัศมีห้องเผาไหม้ ค่าอัตราการกระจาย E เริ่มแรกถูกให้มีค่าเท่ากับ

$$E = c^{3/4} \cdot k^{3/2} / L$$

ซึ่งจากการเปลี่ยนค่าเริ่มต้นไปต่าง ๆ จะพบว่าค่าเริ่มต้นไม่มีอิทธิพลมากนักต่อผลลัพธ์ที่ได้

Conclusion

กล่าวได้ว่าวิธีทาง numerical โดยยึดหลักพื้นฐานของ finite element ด้วยสูตรของ Lagrangian-Eulerian ถูกใช้เพื่อจำลองการไหลปั่นป่วน (turbulent) ในบริเวณภายในของเครื่องยนต์ :

ปริมาณเฉลี่ยโดยวิธี numerical เห็นด้วยกับผลที่ได้จากการทดลองยกเว้นค่าความเร็ว tangential เฉลี่ย ซึ่งคาดเดาต่ำกว่าความจริงในช่วงอัด. ปริมาณ turbulent ถูกคาดเดาอย่างดี

เพราะฉะนั้นวิธี numerical จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่จะช่วยในการศึกษา aerodynamics ในห้องเผาไหม้ ซึ่งก็หมายความว่า การปรับปรุงบางอย่างของ turbulence model นั้นจำเป็น และเราก็จะได้รับการคาดเดาที่ดีกว่าของปริมาณ turbulent , turbulent kinetic energy , ซึ่งอยู่ต่ำกว่าความจริงในช่วงอัดของ turbulent model.



การศึกษานามการไหลในห้องเผาไหม้โดยทดลอง (สำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ)

ในการศึกษาการไหลในระบบของเครื่องยนต์จังหวะจะทำการศึกษาโดยการวัดความเร็ว และ ถ่ายภาพจาก ด้านบน ด้านข้าง ของการไหล เพื่อดูลักษณะการไหล ในแนวต่าง ๆ อุปกรณ์ และ เครื่องที่ใช้ประกอบชุดทดลอง

1 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องยนต์ สูบเดียว 2 จังหวะ แบบ 2 ports (1 port ไอดี , 1 port ไอเสีย) โดยมีรายละเอียดดังนี้

Yamaha Engine R35 cc	
stroke	2 stroke
cooling	air
combustion chamber	pentroof
Number of cylinder	1
Bore x Stroke	73 mmX 93 mm
compression ratio	7.15 : 1
Displacement Volume	334.8

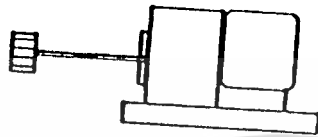
รูปที่ 8 ตารางแสดง specifications ของเครื่องยนต์ทดสอบ

2. กระบอกสูบและฝาสูบกระบอกสูบใส่ใช้ 1 เรซินหล่อใสในอัตราส่วนผสมน้ำยาหล่อแข็ง แล้วนำไปขึ้นรูปโดยการกลึง เจาะ ขัด ดังรูปที่ 9

2. ท่ออากาศรีกใสนำมาตัดตามขนาดที่ต้องการ ดังรูปที่ 9 เนื่องจากขณะทำการทดลองพบว่าเรซินมีรอยได้ง่ายทำให้ต้องขัดบ่อย ๆ

ฝาสูบใช้ พลาสติกแข็งใสอย่างบาง เพื่อลดการ Deflection ของแสงเลเซอร์ ขณะทำการ วัด

3. มอเตอร์ขับ ใช้สำหรับขับเครื่องยนต์ เพราะขณะทดสอบจะไม่มีกระแสเปิดจริง ๆ จึงใช้มอเตอร์ 3 Phase ชนิด V.S. Motor มีแรงควบคุมสำหรับปรับความเร็วได้

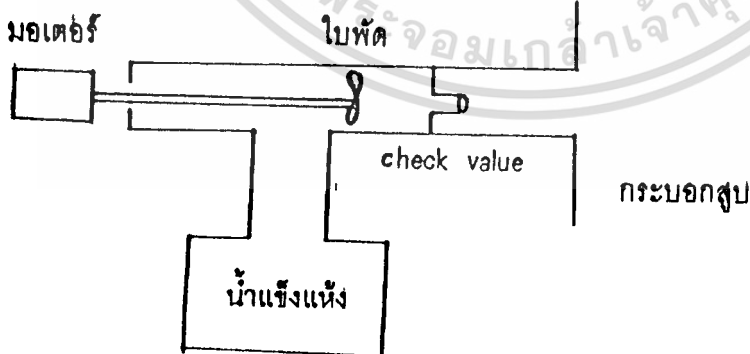


รูปที่ 9 แสดงการต่อมอเตอร์ เพื่อขับเครื่องยนต์

ระหว่างเพลลาของมอเตอร์ กับ เพลลาของเครื่องยนต์ จะมีเฟืองทดเพื่อสามารถปรับความเร็วของลูกสูบที่ความเร็วรอบคงที่มากขึ้น ขณะที่เครื่องยนต์หมุนความเร็วรอบต่ำ

4. Photo sensor เพื่อวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์
5. ระบบการป้อนอนุภาค (Seeding System)

ในการทดลองเราจะใช้ไอจากน้ำแข็งแห้ง มีมอเตอร์คอยหมุนใบพัดเพื่อดูด ไอในถัง และพ่นสู่กระบอกสูบและมี valve กันกลับ เพื่อกันไอย้อนกลับในจังหวะอัด

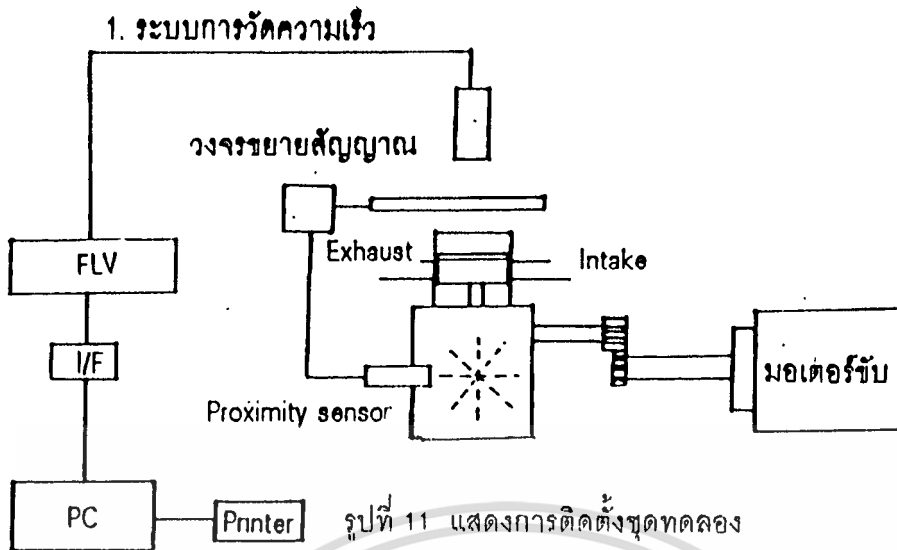


รูปที่ 10 ระบบการป้อนอนุภาค

6. ลูกสูบเนื่องจากลูกสูบเก่าแข็งและก่อให้เกิดรอยแก่กระบอกสูบมากจึงกลึงกระบอกสูบใหม่โดยใช้เรซิน โดยทำให้สามารถมองเห็นภายในได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

7. ระบบสังเกตการไหล Flow visualization ใช้วิธีตามรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Particle Tracing Velocity) โดยในชุดการทดสอบจะประกอบด้วย

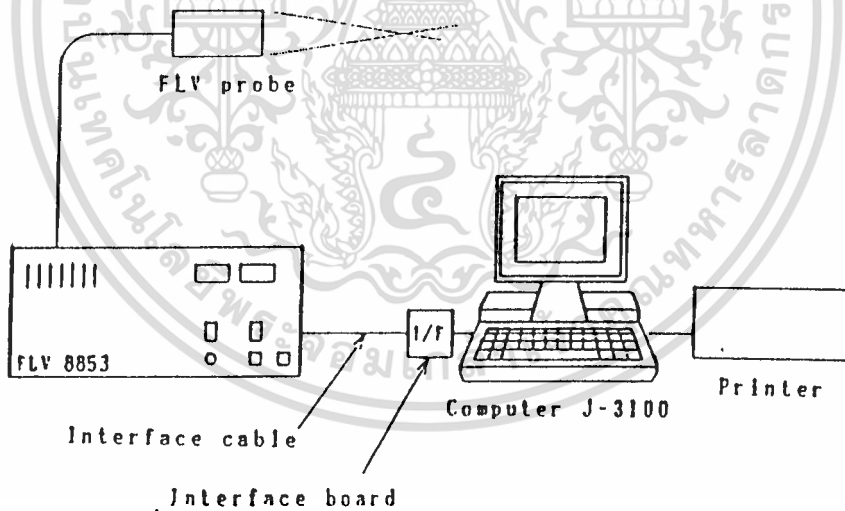
1. ระบบการวัดความเร็ว



รูปที่ 11 แสดงการติดตั้งชุดทดลอง

ในระบบการวัดความเร็วจะประกอบด้วย

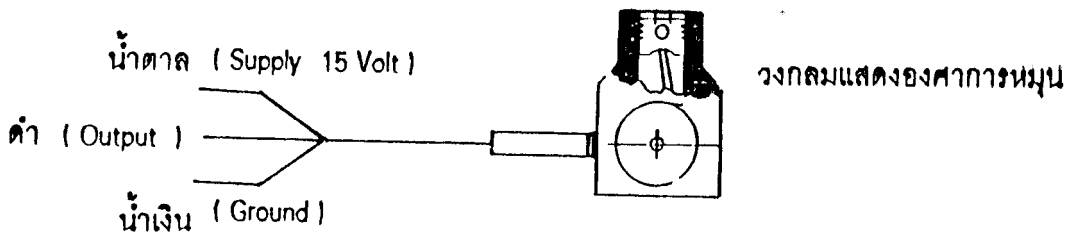
1. FLV จะเป็นตัวกำเนิดเครื่องแสงเลเซอร์และส่งไปตามท่อนำแสงสู่ Probe รวมทั้งยังเป็น ตัวรับสัญญาณ ณ จุดตัด เพื่อส่งไปวิเคราะห์ผลที่ เครื่องคอมพิวเตอร์
2. Computer J-3100 เป็น Computer ที่มีโปรแกรมการวิเคราะห์ผลที่ได้รับจาก FLV เพื่อวัดความเร็ว ณ จุดที่ทำการวัด
3. Printer พิมพ์ผลที่ได้



รูปที่ 12 แสดงการต่อ FLV PI Printer

4. วงจรควบคุมการปิด - เปิดของแสงเลเซอร์ เพื่อกำหนด จุด และ Crank angle ขณะทำการวัด ประกอบด้วย

4.1 Proximity sensor เป็นเซนเซอร์ที่ตรวจจับ โลหะที่เข้ามาในรัศมี ใช้ชนิด C Type normal open คือจะปล่อยแรงดันไฟฟ้าขนาด 0.5 V เมื่อมีโลหะ มาในรัศมี 1 Cm.

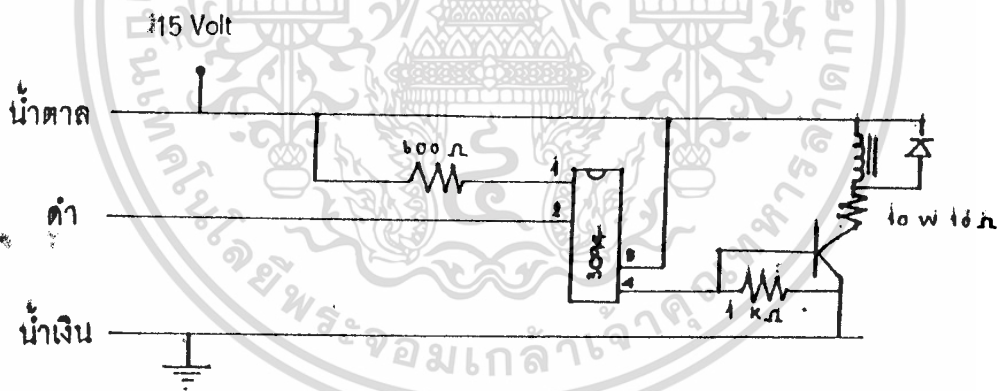


รูปที่ 13 แสดงการติดตั้ง proximity sensor

การทำงานเมื่อเรากำหนด crank - angle ที่จะทำการวัด

ก็นำโลหะไปติดบนวงล้อองศาที่ แสดง องศาการหมุน เมื่อขณะหมุน ถึง on Crank - angle ที่ ต้องการวัด ก่อนโลหะ ก็จะเคลื่อนเข้ามาในรัศมีที่ Proximity - sensor ทำงาน (ปล่อยไฟฟ้าแรงดัน 0.5 volt)

4.2 วงจรขยายสัญญาณและสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำการขยายสัญญาณที่ได้รับ จาก Proximity เพราะ ไฟขนาด 0.5 Volt เราไม่สามารถ นำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง

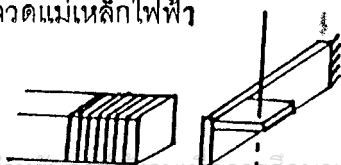


รูปที่ 14 วงจรแปลงสัญญาณ Proximity เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อ Proximity - sensor ปล่อยสัญญาณออกมาสู่ วงจรดังรูปที่ 8 จะก่อให้เกิด สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เราจะนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ไป เปิด - ปิด วงจร Shutter

4.3 วงจรShutterนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากวงจรรูปที่16มาดูดตัวกันแสงเลเซอร์ ดังรูป

ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 15 แสดงวงจร Shutter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสัญญาณของ Proximity-sensor จะดูดแผ่นกันไว้ laser beam ทำให้แผ่นกันเปิด-ปิดได้ ตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมการวัดความเร็วของอนุภาคที่จุดต่างๆได้

ระบบการถ่ายภาพ ใช้ถ่ายภาพพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการ เพื่อนำผลของความเร็วที่วัดได้และภาพมาวิเคราะห์ร่วมกัน อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย

- 1 กล้อง V.D.O ใช้ JVC แบบปรับความเร็วของ Shutter ได้
- 2 วงจรบังคับการปิด - เปิดไฟ เพื่อถ่ายภาพ ณ Crank angle และ Plane ที่ต้องการโดยใช้วงจรขยายสัญญาณจาก Proximity แต่แทนที่จะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ก็ใช้หลอดไฟแทน
3. แผ่นเปิดให้แสงผ่านตาม Plane ที่ต้องการ



วิธีทดลอง

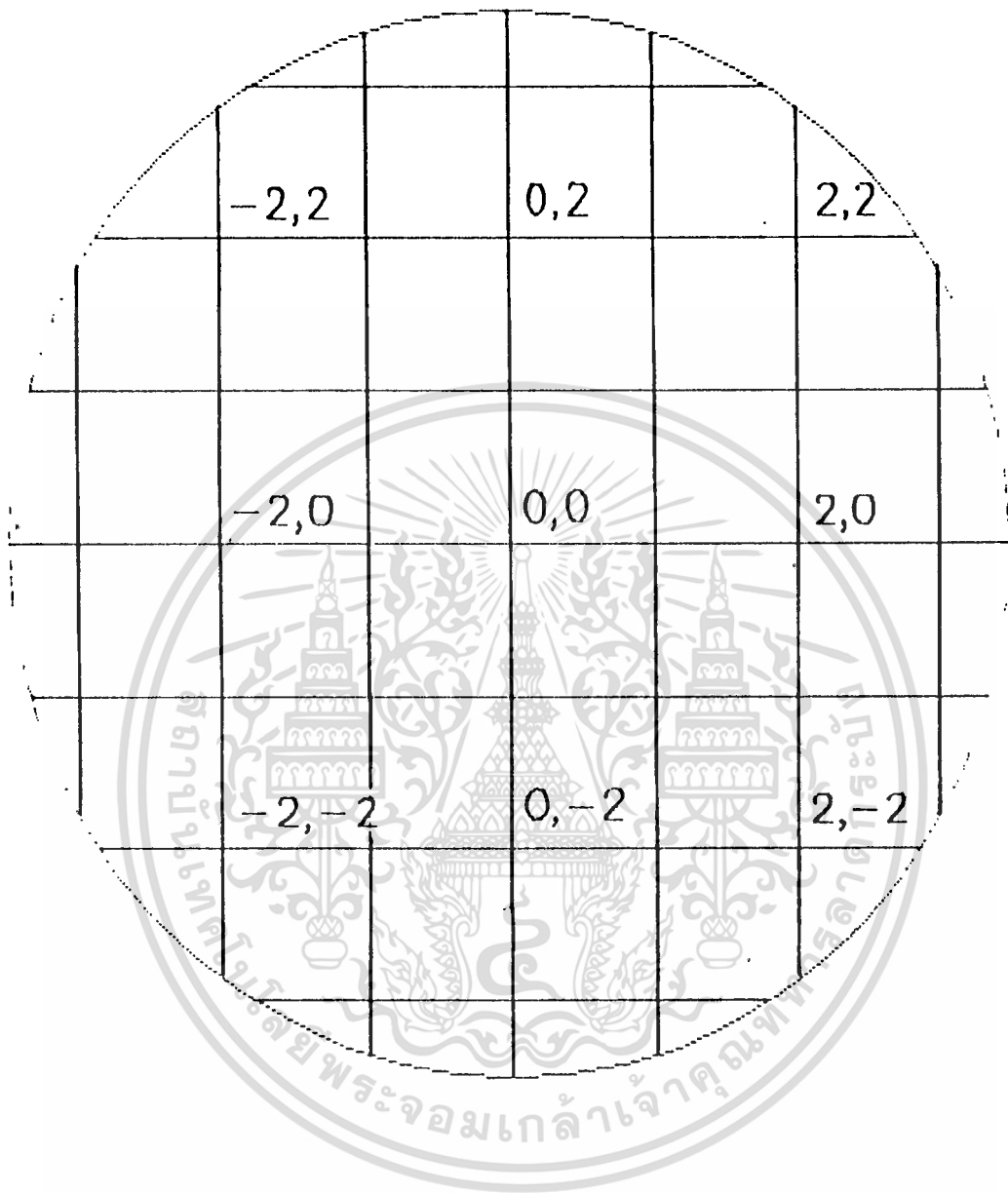
ในการทดสอบการไหลของอากาศในกระบอกสูบ ของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ เริ่มโดย

1. เปิดเครื่อง FLV , PC
2. Start motor โดยปรับความเร็ว ณ ที่ต้องการทดสอบ
3. ทำการถ่ายภาพ โดย ใช้ไฟจากสัญญาณ Proximity
4. เปลี่ยน ระยะ ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต้องการวัด ณ Crank angle ที่ทดลอง
5. เปลี่ยน ตำแหน่ง crank angle ไปเรื่อย ๆ จนครบ
6. กำหนด crank angle ซึ่งเราแบ่งไว้ $0, 30, 60, \dots, 360^\circ$ และจำนวน จุดในแต่ละ plane และจำนวน plane ที่จะทำการวัด



รูปที่ 12 ตำแหน่ง Crank angle /ระดับต่างๆของplane และตำแหน่งของจุดที่ทำการวัด

7. ตั้งจุดตัดของ Laser - beam ณ จุด และ ตำแหน่ง crank angle ที่ต้องการวัด
8. เปิด Supply ของ Proximity เพื่อทำการวัด
9. บันทึกผล และทำการ Set จุดต่อไป ที่จะทำการวัด ณ Crank angle เดิมจนหมด ทุกจุด ใน Plane นั้น จากนั้นก็เลื่อน Plane ต่อไป จนหมด และเปลี่ยน Crank angle ไปเรื่อย ๆ จนหมด



รูปที่ 18 ตารางแสดงตำแหน่งต่างๆของอัฐราเร็วที่ทำกรวัดจากเคื่อง FIV ณ crank angle ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANOMAX

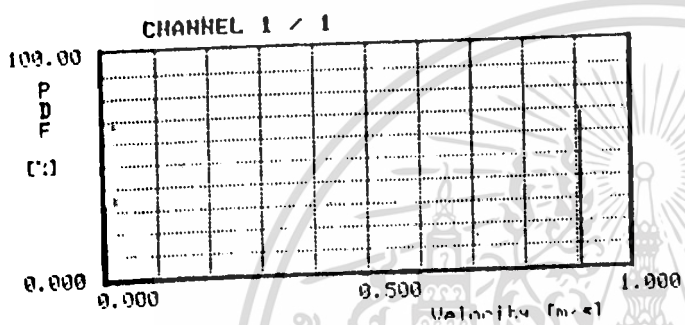
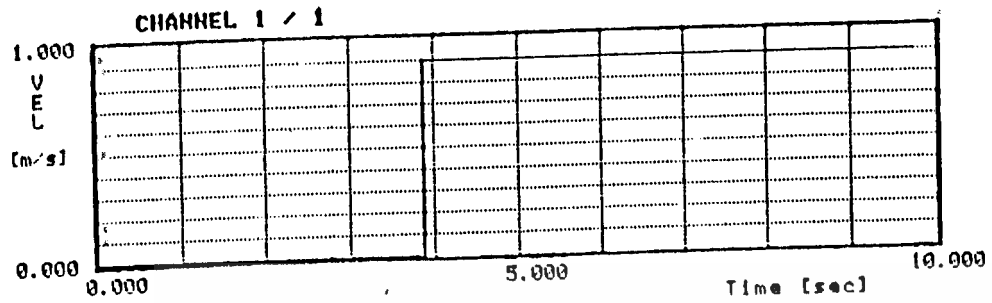
<Measure>

File TEST1.
Date 03/18/95

Position: X: -2 Y: -2 Z: 5
Comment: SAMPLE TEST

θ : 30

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. O. D. : 103/1024
Average Vel. : 0.6180 [m/s]
Standard Dev. : 0.4243 [m/s]
Turbulence Int. : 68.6607 [%]
Skewness Factor : -0.3949
Flatness Factor : 1.5926
Max. Vel. : 0.9093 [m/s]
Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

Data Not Saved

KANOMAX

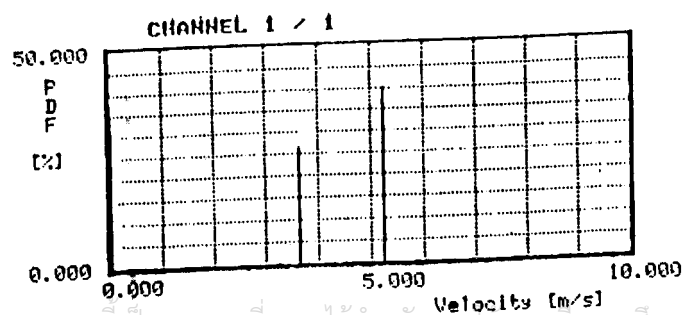
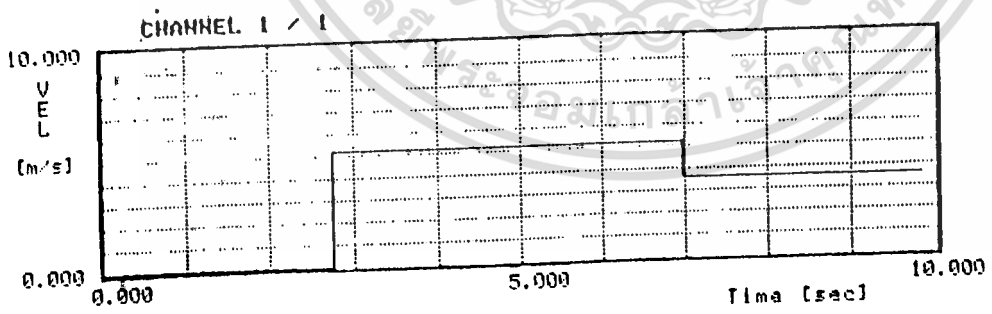
<Measure>

File TEST1.
Date 03/18/95

Position: X: -2 Y: -2 Z: 5
Comment: SAMPLE TEST

θ : 90

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. O. D. : 97/1024
Average Vel. : 3.0620 [m/s]
Standard Dev. : 2.2907 [m/s]
Turbulence Int. : 74.8093 [%]
Skewness Factor : -0.2230
Flatness Factor : 1.4370
Max. Vel. : 5.2741 [m/s]
Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

<F1>COMMAND <Q>QUIT Data Not Saved

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกสถานที่ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

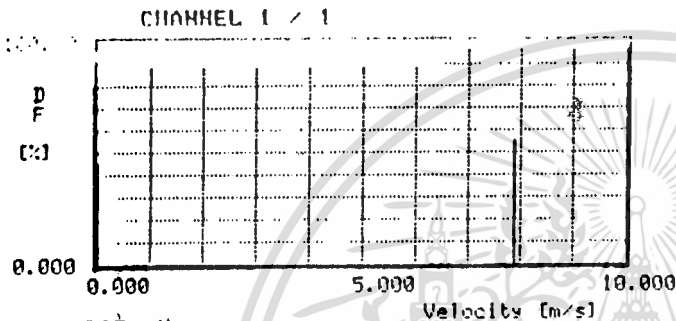
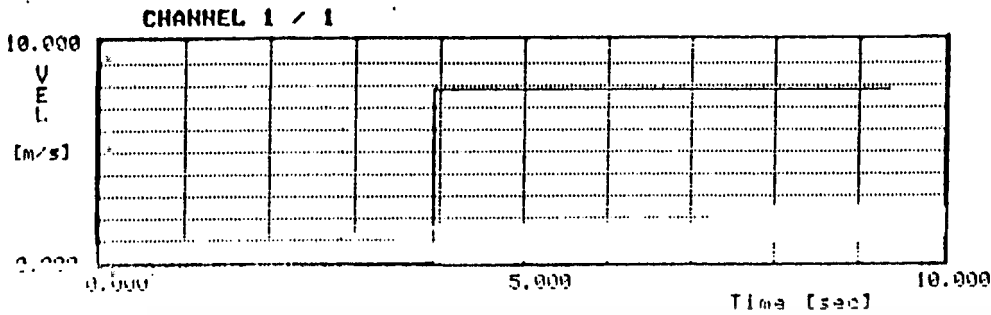
KANOMAX

<Measure>

File TEST1. Position [mm] X: 1 Y: -2 Z: 5
 Date 09/18/95 Comment SAMPLE TEST

θ : 110

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. D. D. : 260/1024
 Average Vel. : 4.3449 [m/s]
 Standard Dev. : 3.9301 [m/s]
 Turbulence Int. : 90.4534 [%]
 Skewness Factor : -0.1005
 Flatness Factor : 1.0404
 Max. Vel. : 7.8998 [m/s]
 Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

<F1>COMMAND <Q>QUIT Data Not Saved

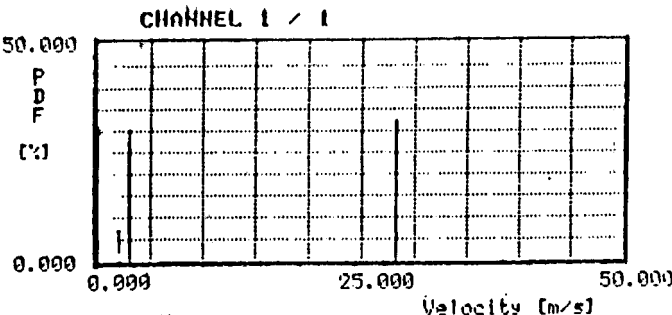
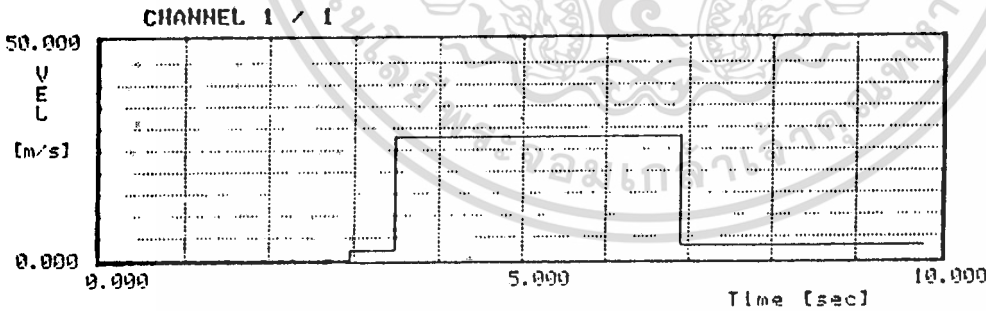
KANOMAX

<Measure>

File TEST1. Position [mm] X: 2 Y: -2 Z: 3
 Date 09/18/95 Comment SAMPLE TEST

θ : 50

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. D. D. : 262/1024
 Average Vel. : 10.1059 [m/s]
 Standard Dev. : 12.5047 [m/s]
 Turbulence Int. : 123.7367 [%]
 Skewness Factor : 0.3699
 Flatness Factor : 1.5991
 Max. Vel. : 28.2265 [m/s]
 Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

<F1>COMMAND <Q>QUIT Data Not Saved

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

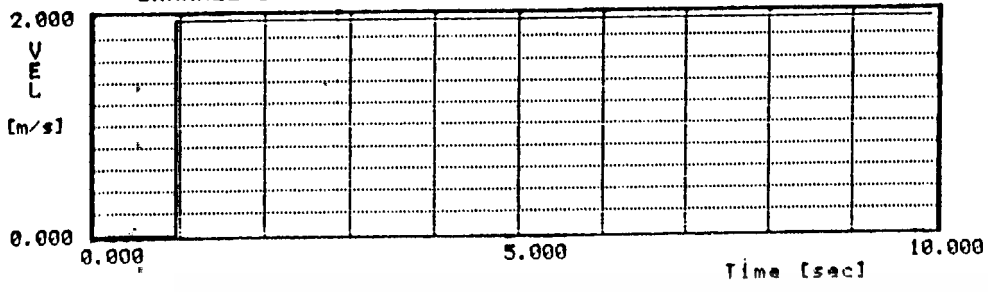
KANOMAX

<Measure>

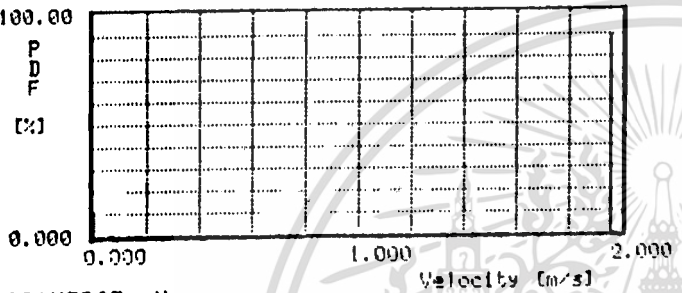
File TEST1. Position X: 2 Y: -3 Z: 5
 Date 08/18/95 Comment SAMPLE TEST
 θ : 90

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n) = 3.001 OFF

CHANNEL 1 / 1



CHANNEL 1 / 1



N. O. D. : 260/1024
 Average Vel. : 1.7445 [m/s]
 Standard Dev. : 0.6181 [m/s]
 Turbulence Int. : 35.4310 [%]
 Skewness Factor : -1.2340
 Flatness Factor : 7.0911
 Max. Vel. : 1.9635 [m/s]
 Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None <F1>COMMAND <Q>QUIT Data Not Saved

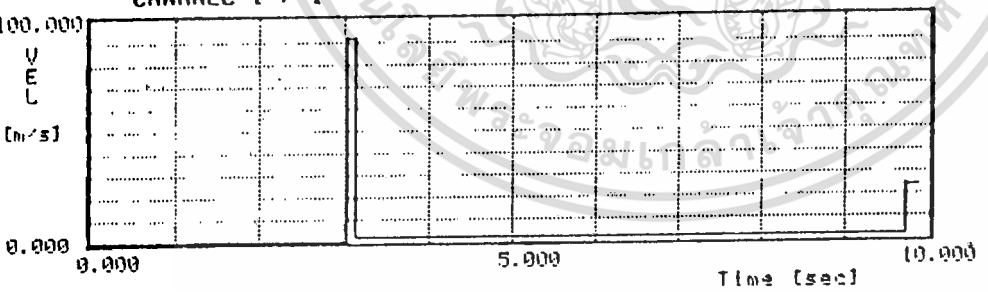
KANOMAX

<Measure>

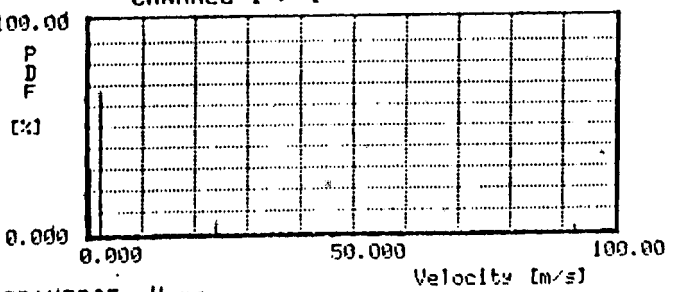
File TEST1. Position X: 2 Y: -3 Z: 5
 Date 08/18/95 Comment SAMPLE TEST
 θ : 150

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n) = 3.001 OFF

CHANNEL 1 / 1



CHANNEL 1 / 1



N. O. D. : 184/1024
 Average Vel. : 3.6630 [m/s]
 Standard Dev. : 12.0769 [m/s]
 Turbulence Int. : 329.6945 [%]
 Skewness Factor : 3.3256
 Flatness Factor : 49.3496
 Max. Vel. : 92.6787 [m/s]
 Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None <F1>COMMAND <Q>QUIT Data Not Saved

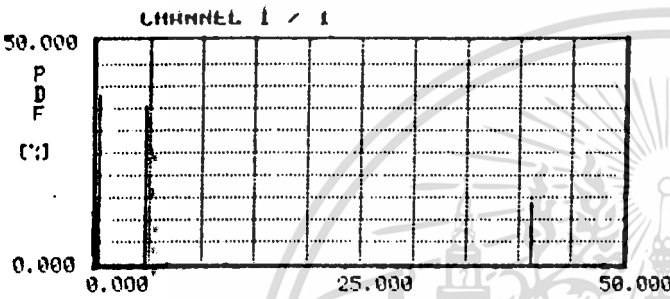
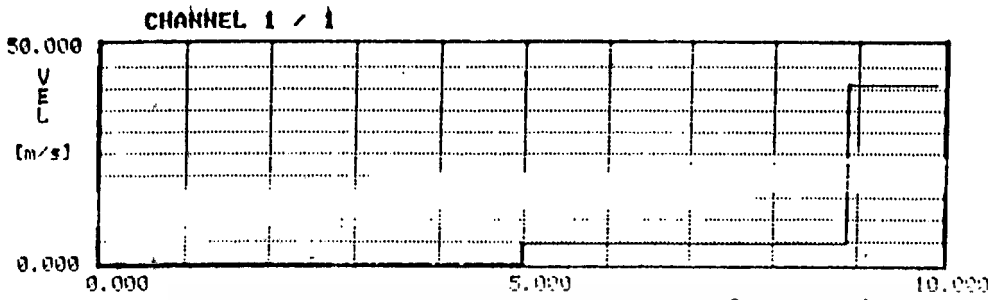
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANOMAX

<Measure>

File TEST1. Position X: -2 Y: -2 Z: 9
Date 09/10/85 Comment SAMPLE TEST

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. O. D. : 170/1024
Average Vel. : 7.3293 [m/s]
Standard Dev. : 13.5940 [m/s]
Turbulence Int. : 185.5004 [%]
Skewness Factor : 1.0185
Flatness Factor : 5.3227
Max. Vel. : 41.3108 [m/s]
Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

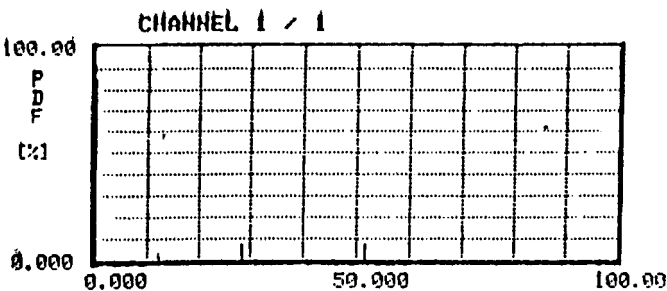
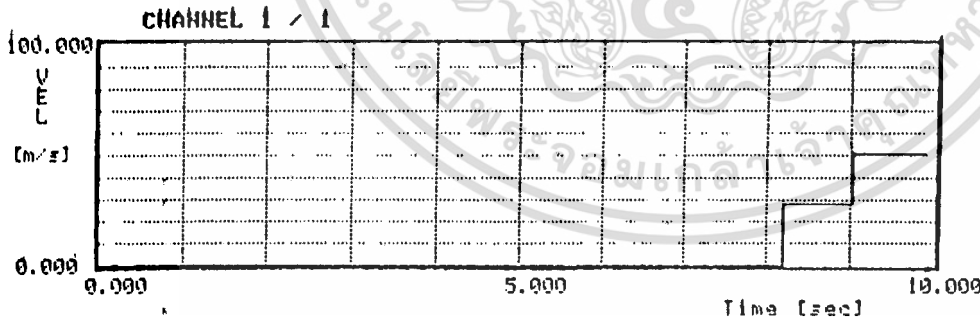
<F1>COMMAND <Q>QUIT Data Not saved

KANOMAX

<Measure>

File TEST1. Position X: -2 Y: -2 Z: 3
Date 09/10/85 Comment SAMPLE TEST

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. O. D. : 149/1024
Average Vel. : 5.9367 [m/s]
Standard Dev. : 14.9274 [m/s]
Turbulence Int. : 251.4445 [%]
Skewness Factor : 1.1660
Flatness Factor : 6.9241
Max. Vel. : 51.6622 [m/s]
Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

<F1>COMMAND <Q>QUIT Data Not saved

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

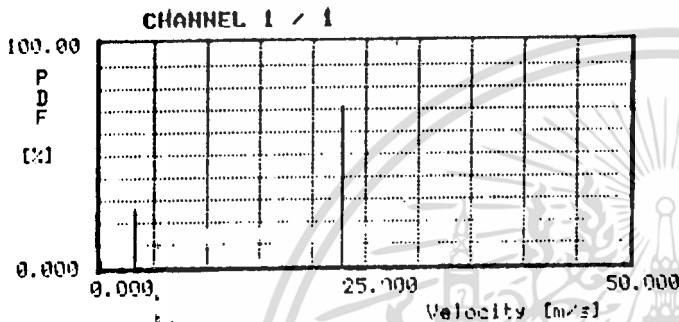
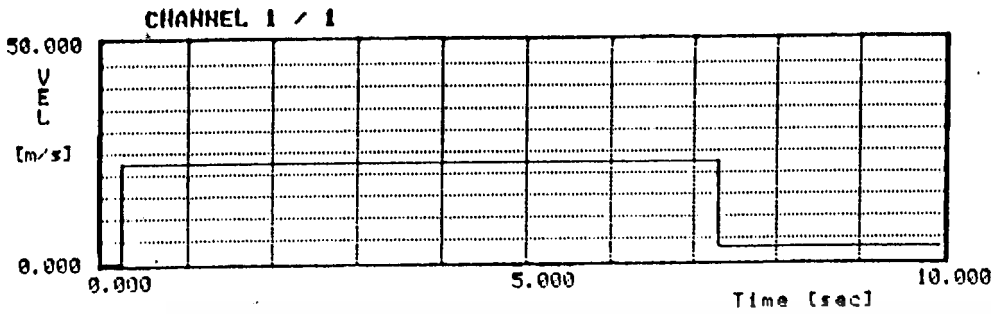
KANOMAX

<Measure>

File TEST1. : Position [mm] X: -2 Y: -2 Z: 0
Date 09/10/95 Comment SAMPLE TEST

θ : 120

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. O. D. : 153/1024
Average Vel. : 17.2146 [m/s]
Standard Dev. : 9.0652 [m/s]
Turbulence Int. : 52.6601 [%]
Skewness Factor : -0.4764
Flatness Factor : 1.9323
Max. Vel. : 22.9628 [m/s]
Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

<F>COMMAND <Q>QUIT Data Not Saved

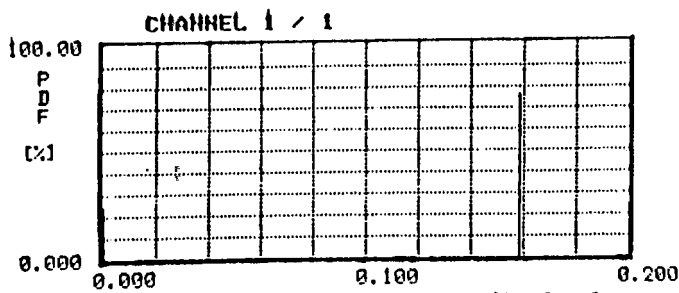
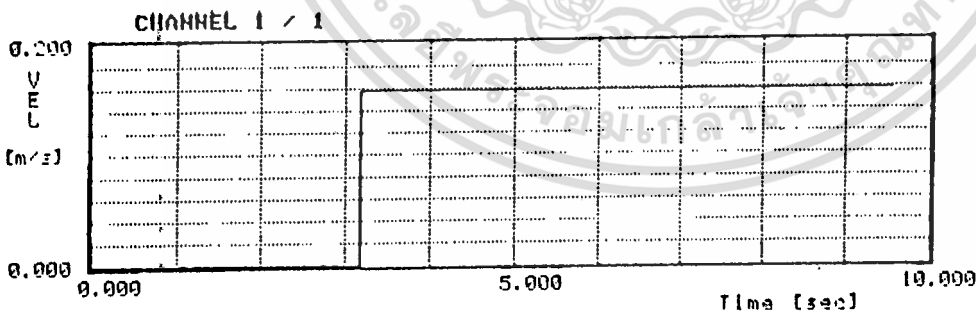
KANOMAX

<Measure>

File TEST1. : Position [mm] X: -2 Y: -2 Z: 3
Date 09/10/95 Comment SAMPLE TEST

θ : 120

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. O. D. : 171/1024
Average Vel. : 0.1209 [m/s]
Standard Dev. : 0.0679 [m/s]
Turbulence Int. : 56.1591 [%]
Skewness Factor : -0.6035
Flatness Factor : 2.4861
Max. Vel. : 0.1591 [m/s]
Min. Vel. : 0.0000 [m/s]

TRAVERSE None

<F>COMMAND <Q>QUIT Data Not Saved

ตารางแสดงค่าขนาดอัตราเร็วที่วัดจากเครื่อง FLV ณ crank angle และ ตำแหน่งต่าง ๆ

Crank angle	Position x.y.z	Velocity (m/s)
0	-2.-2.5	5.9637
	-2. 0.5	14.67
	-2. 2.5	1.0603
	0.-2.5	20.4179
	0. 0.5	1.0603
	0. 2.5	0.0542
	2.-2.5	6.4122
	2. 0.5	1.757
	2. 2.5	5.6412
30	-2.-2.5	0.618
	-2. 0.5	2.391
	-2. 2.5	25.326
	0.-2.5	0.0381
	0. 0.5	25.326
	0. 2.5	2.3928
	2.-2.5	10.1059
	2. 0.5	0.0942
	2. 2.5	6.1294
60	-2.-2.5	7.3283
	-2. 0.5	9.0741
	-2. 2.5	0.8124
	0.-2.5	0.2569
	0. 0.5	0.8124
	0. 2.5	11.1693
	2.-2.5	2.5162
	2. 0.5	0.0827
	2. 2.5	8.401
90	-2.-2.5	1.7445
	-2. 0.5	0.0666
	-2. 2.5	0.8124
	0.-2.5	0.5303
	0. 0.5	5.1428
	0. 2.5	0.3229
	2.-2.5	1.7445
	2. 0.5	1.364
	2. 2.5	3.1015
120	-2.-2.5	1.2442
	-2. 0.5	0.2189
	-2. 2.5	10.3627
	0.-2.5	21.5909

	0.0.5	10.3627
	0.2.5	6.2551
	2.-2.5	1.2442
	2.0.5	1.0507
	2.2.5	0.9156
150	-2.-2.5	3.284
	-2.0.5	1.4494
	-2.2.5	0.9586
	0.-2.5	18.6684
	0.0.5	0.9586
	0.2.5	7.1401
	2.-2.5	3.663
	2.0.5	1.758
	2.2.5	1.8869
180	-2.-2.5	3.663
	-2.0.5	1.1084
	-2.2.5	0.0864
	0.-2.5	0.2687
	0.0.5	0.0864
	0.2.5	0.91649
	2.-2.5	3.2846
	2.0.5	0.3012
	2.2.5	4.0561
210	-2.-2.5	17.0662
	-2.0.5	22.496
	-2.2.5	22.7915
	0.-2.5	3.8439
	0.0.5	22.7915
	0.2.5	2.1197
	2.-2.5	17.0662
	2.0.5	2.9212
	2.2.5	22.3441
240	-2.-2.5	23.3072
	-2.0.5	2.3454
	-2.2.5	4.5869
	0.-2.5	9.6097
	0.0.5	4.5869
	0.2.5	0.0343
	2.-2.5	23.3072
	2.0.5	3.6838
	2.2.5	19.9861
270	-2.-2.5	1.45511
	-2.0.5	49.1165
	-2.2.5	3.2189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ข้อมูลไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	0.-2.5	1.3132
	0.0.5	3.2189
	0.2.5	1.3132
	2.-2.5	1.4511
	2.0.5	9.6364
	2.2.5	3.3631
300	-2.-2.5	2.4042
	-2.0.5	24.8123
	-2.2.5	0.7071
	0.-2.5	0.7071
	0.0.5	0.435
	0.2.5	0.7071
	2.-2.5	2.4042
	2.0.5	10.42
	2.2.5	0.8869
330	-2.-2.5	4.3449
	-2.0.5	2.0913
	-2.2.5	6.8897
	0.-2.5	6.8897
	0.0.5	8.0874
	0.2.5	6.8897
	2.-2.5	4.3449
	2.0.5	2.1052
	2.2.5	3.1674
360	-2.-2.5	4.5829
	-2.0.5	12.0235
	-2.2.5	16.4719
	0.-2.5	16.4179
	0.0.5	3.0614
	0.2.5	0.1002
	2.-2.5	4.5825
	2.0.5	2.4511
	2.2.5	5.849

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Crank angle	position x, y, z	Velocity (m/s)
0	-2, -2, 3	0.9879
	-2, 0, 3	2.9286
	-2, 2, 3	1.3319
	0, -2, 3	2.7259
	0, 0, 3	0.9113
	0, 2, 3	0.0976
	2, -2, 3	0.8131
	2, 0, 3	0.9286
	2, 2, 3	1.0015
30	-2, -2, 3	1.6879
	-2, 0, 3	11.8865
	-2, 2, 3	4.0116
	0, -2, 3	0.3785
	0, 0, 3	22.4116
	0, 2, 3	1.4586
	2, -2, 3	2.4123
	2, 0, 3	4.8865
	2, 2, 3	5.4811
60	-2, -2, 3	1.4306
	-2, 0, 3	2.1968
	-2, 2, 3	1.1128
	0, -2, 3	9.593
	0, 0, 3	0.986
	0, 2, 3	15.1167
	2, -2, 3	0.8218
	2, 0, 3	2.1968
	2, 2, 3	9.1174
90	-2, -2, 3	0.1353
	-2, 0, 3	1.2278
	-2, 2, 3	3.0011
	0, -2, 3	1.5455
	0, 0, 3	9.1135
	0, 2, 3	0.8112
	2, -2, 3	1.24443
	2, 0, 3	1.2278
	2, 2, 3	1.1109
120	-2, -2, 3	1.8771
	-2, 0, 3	1.165
	-2, 2, 3	1.6589
	0, -2, 3	16.0843

	0, 0, 3	4.1132
	0, 2, 3	15.9118
	2, -2, 3	1.2843
	2, 0, 3	1.165
	2, 2, 3	2.8993
150	-2, -2, 3	3.2183
	-2, 0, 3	1.3118
	-2, 2, 3	7.2165
	0, -2, 3	10.5031
	0, 0, 3	0.8864
	0, 2, 3	8.1109
	2, -2, 3	2.1145
	2, 0, 3	1.3118
	2, 2, 3	1.5594
210	-2, -2, 3	0.5972
	-2, 0, 3	0.2938
	-2, 2, 3	0.8597
	0, -2, 3	2.5507
	0, 0, 3	32.5643
	0, 2, 3	4.117
	2, -2, 3	12.0614
	2, 0, 3	0.2938
	2, 2, 3	18.0169
240	-2, -2, 3	29.1264
	-2, 0, 3	15.0282
	-2, 2, 3	43.4576
	0, -2, 3	0.1813
	0, 0, 3	8.1174
	0, 2, 3	0.9554
	2, -2, 3	28.1102
	2, 0, 3	10.0282
	2, 2, 3	34.2105
270	-2, -2, 3	4.6623
	-2, 0, 3	23.8783
	-2, 2, 3	3.811
	0, -2, 3	5.7276
	0, 0, 3	9.1694
	0, 2, 3	3.1129
	2, -2, 3	3.4453
	2, 0, 3	20.8783
	2, 2, 3	2.8991
300	-2, -2, 3	22.6761

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	-2.2.3	30.6991
--	--------	---------

	0.-2.3	1.9181
	0.0.3	0.4594
	0.2.3	3.1195
	2.-2.3	0.8895
	2.0.3	8.4565
	2.2.3	1.0001
330	-2.-2.3	18.2113
	-2.0.3	1.5809
	-2.2.3	16.4591
	0.-2.3	1.1121
	0.0.3	3.2615
	0.2.3	0.9557
	2.-2.3	1.2159
	2.0.3	1.5869
	2.2.3	7.1125
360	-2.-2.3	1.1254
	-2.0.3	3.3211
	-2.2.3	1.9548
	0.-2.3	2.0158
	0.0.3	2.0195
	0.2.3	0.1025
	2.-2.3	1.0481
	2.0.3	0.841
	2.2.3	0.8119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วเมื่อเทียบกับ crank angle ณ ตำแหน่งใด ๆ

Plot3D " Graphic relation of velocity and angle"

<<Graphics`Graphics3D`

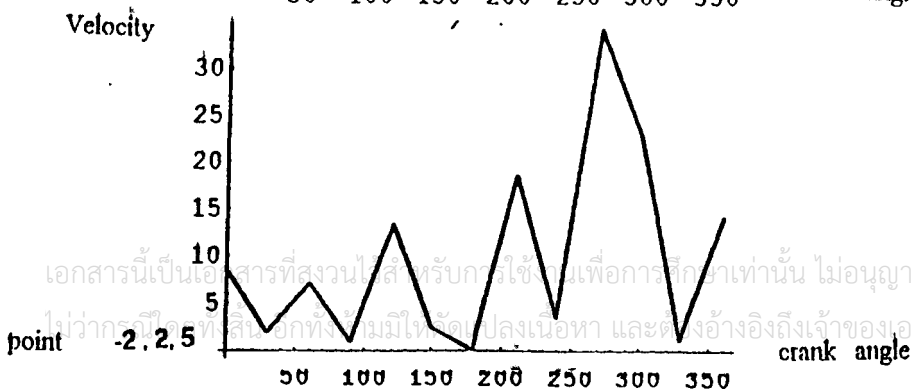
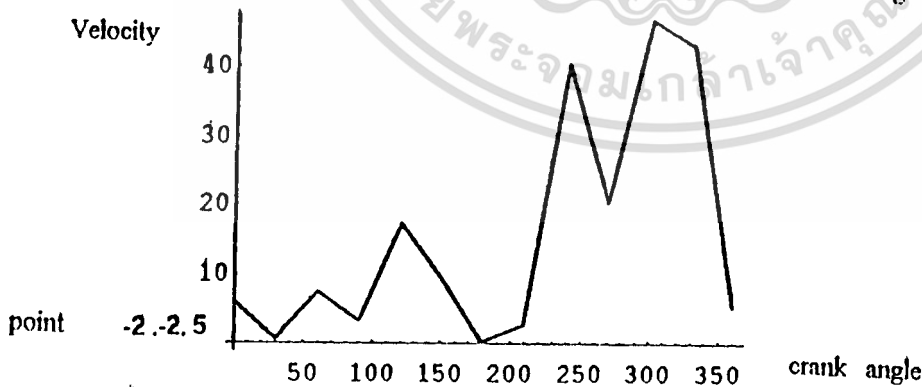
```
list1-{{0,14.6760},{30,2.3961},{60,9.0741},{90,0.0666},{120,0.2189},
(150,1.4494},{180,1.1084},{210,22.4960},{240,2.3454},{270,49.1165},
(300,24.8123},{330,2.0913},{360,12.0235}}
```

```
list2-{{0,5.9367},{30,0.6180},{60,7.3283},{90,3.0620},{120,17.2146},
(150,9.6299},{180,0.1209},{210,2.5902},{240,40.1583},{270,20.1423},
(300,46.3969},{330,42.7214},{360,5.1400}}
```

```
list3-{{0,8.5670},{30,1.8901},{60,7.0192},{90,0.8991},{120,13.2164},
(150,2.4494},{180,0.1301},{210,18.459},{240,3.3544},{270,34.1163},
(300,22.8024},{330,1.0531},{360,14.0112}}
```

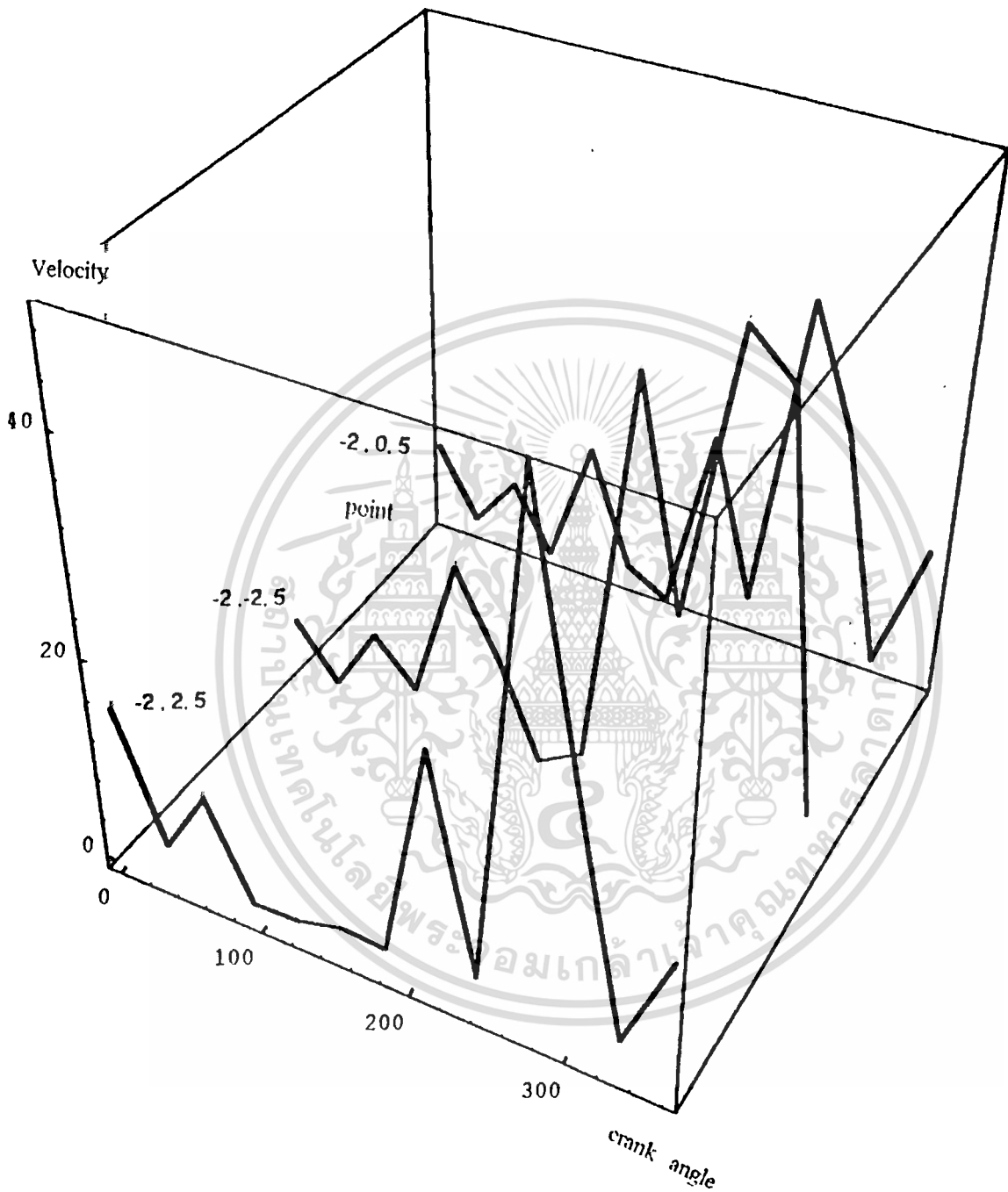
```
gtab = Table[{ListPlot[list1,PlotJoined->True],
ListPlot[list2,PlotJoined->True],
ListPlot[list3,PlotJoined->True]}
```

```
Show[StackGraphics[gtab]]
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในข้อปลงเนื้อหา และสงวนอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 รูป 3 มิติแสดงระหว่างความเร็ว มุมข้อเหวี่ยง ที่ plane ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
<<Graphics`Graphics3D`
```

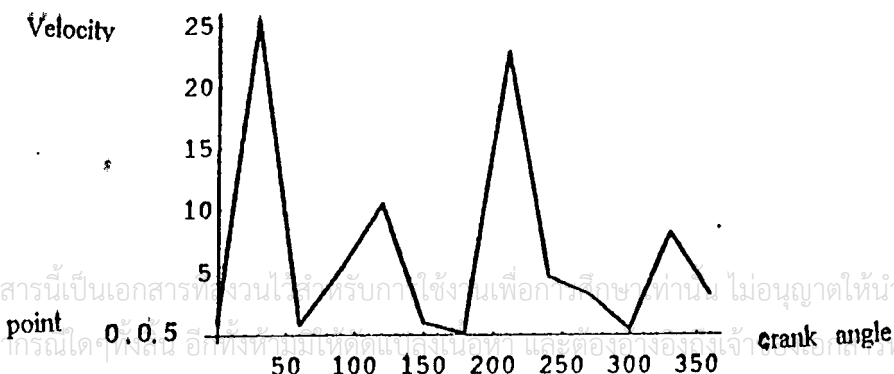
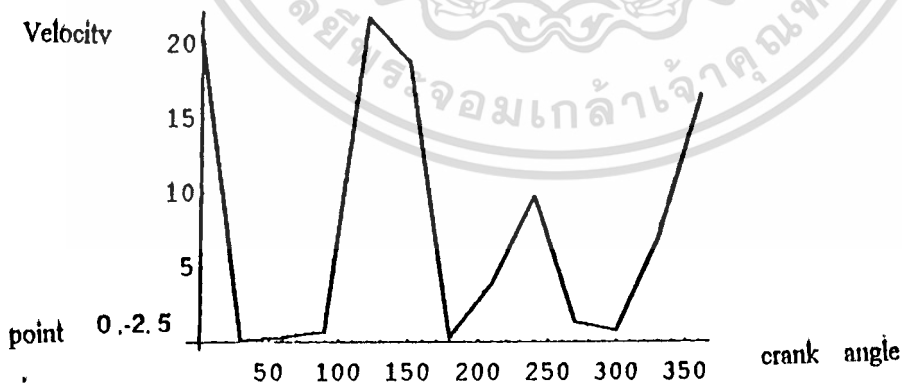
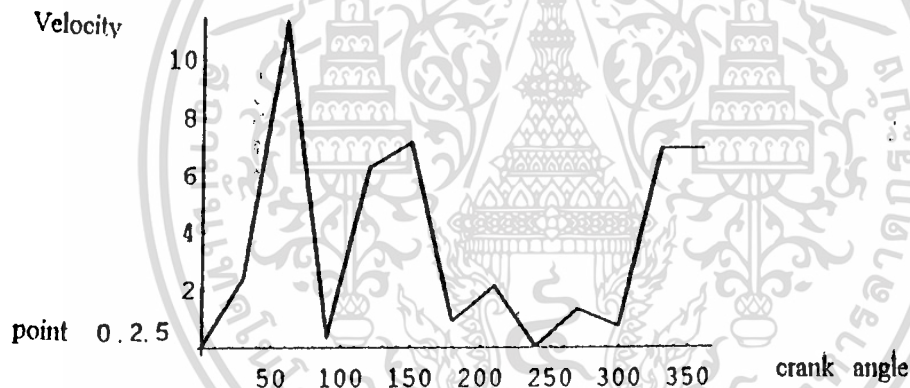
```
list1={{0,0.0542},{30,2.3928},{60,11.1693},{90,0.3229},{120,6.255};  
{150,7.1401},{180,0.9164},{210,2.1197},{240,0.0343},{270,1.3132},  
{300,0.7071},{330,6.8897},{360,6.8897}}
```

```
list2={{0,20.4179},{30,0.0381},{60,0.2569},{90,0.6303},{120,21.5909},  
{150,18.6684},{180,0.2687},{210,3.8439},{240,9.6097},{270,1.3132},  
{300,0.7071},{330,6.8897},{360,16.4179}}
```

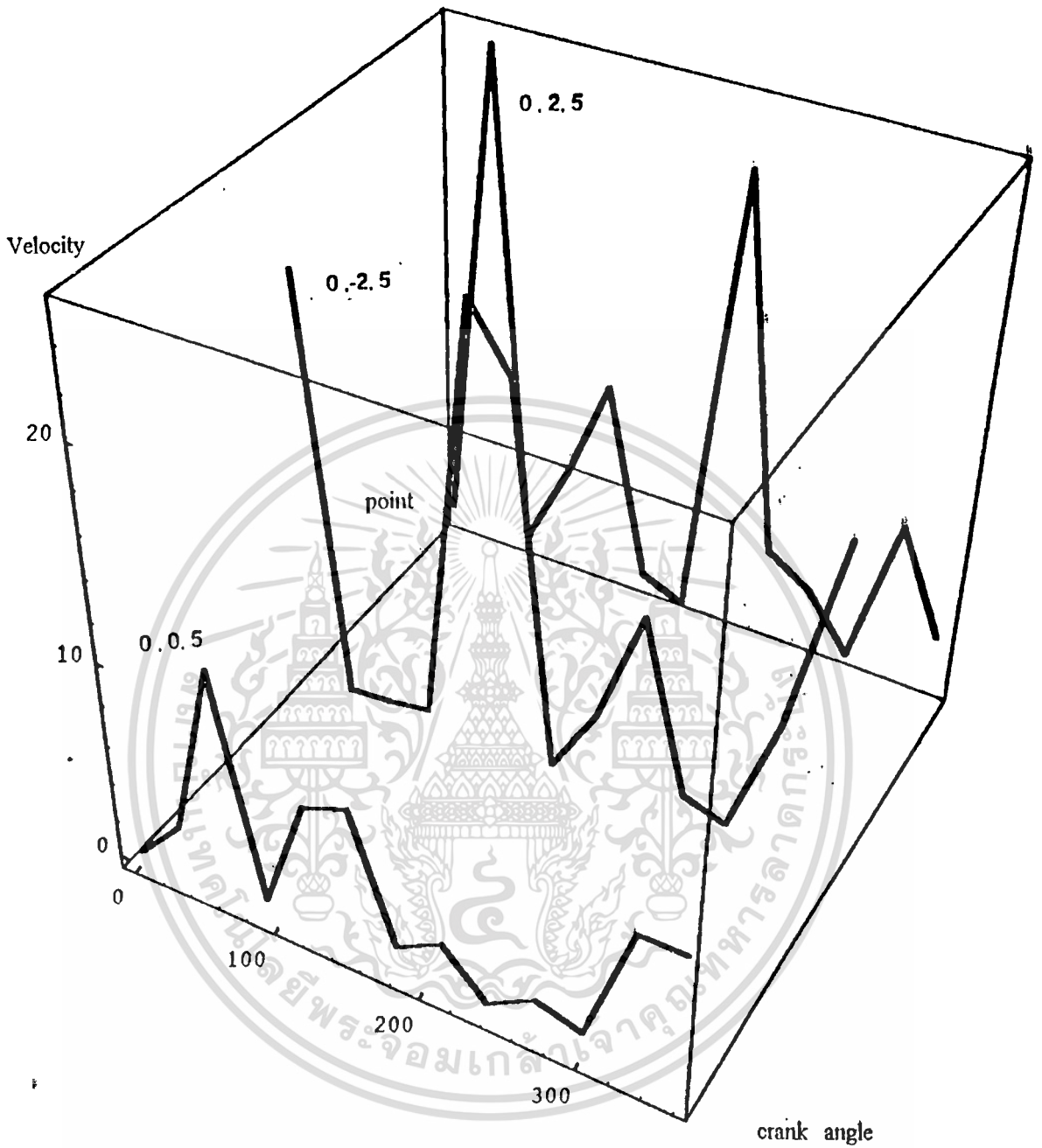
```
list3={{0,1.0603},{30,25.3260},{60,0.8124},{90,5.1428},{120,10.3627},  
{150,0.9586},{180,0.0864},{210,22.7915},{240,4.5869},{270,3.2189},  
{300,0.4350},{330,8.0874},{360,3.0614}}
```

```
gtab = Table[{ListPlot[list1,PlotJoined->True],  
ListPlot[list2,PlotJoined->True],  
ListPlot[list3,PlotJoined->True]}
```

```
Show[StackGraphics[gtab]]
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแบบลงมือทำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 23 รูป 3 มิติแสดงระหว่างความเร็ว มุมข้อเหวี่ยง ที่ plane ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In[25]:=

<<Graphics`Graphics3D`

In[26]:=

```
list1={{0,6.4122},{30,10.1059},{60,2.5162},{90,1.7445},{120,1.2442},
{150,3.6630},{180,3.2840},{210,17.0662},{240,23.3072},{270,1.4511},
{300,2.4042},{330,4.3449},{360,4.5829}}
```

In[27]:=

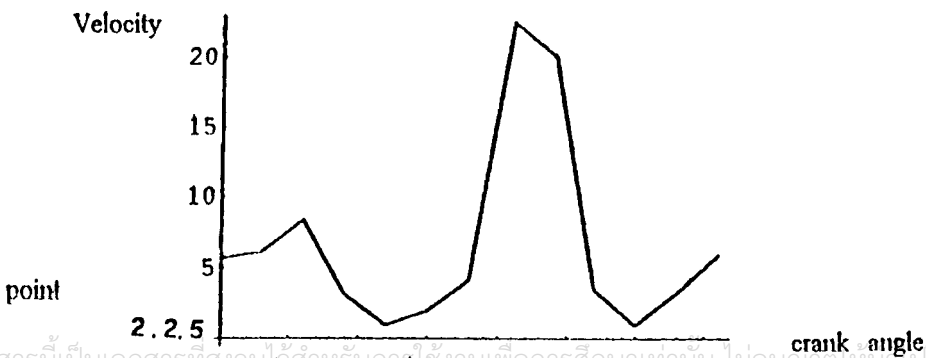
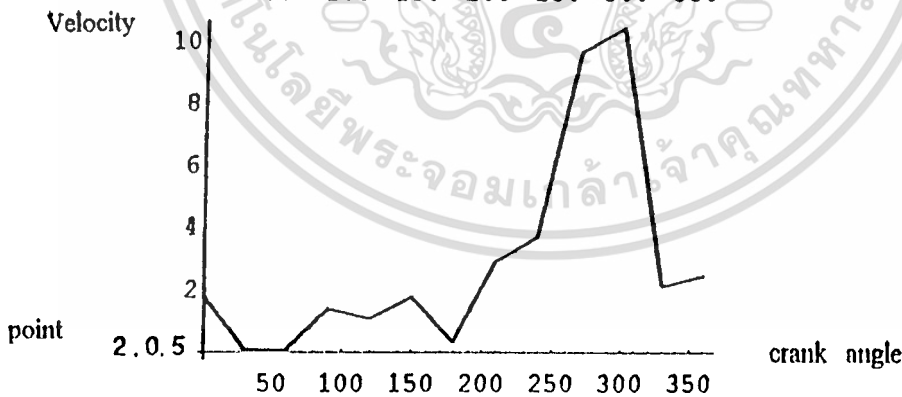
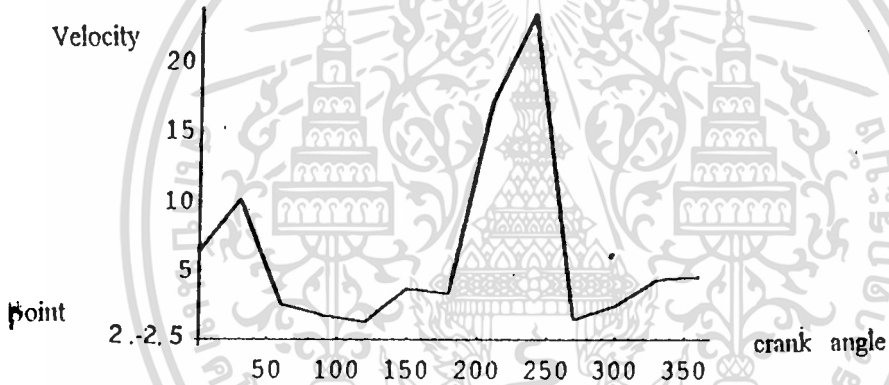
```
list2={{0,1.7570},{30,0.0942},{60,0.0827},{90,1.3640},{120,1.0507},
{150,1.7580},{180,0.3012},{210,2.9212},{240,3.6838},{270,9.6364},
{300,10.4201},{330,2.1052},{360,2.4511}}
```

In[28]:=

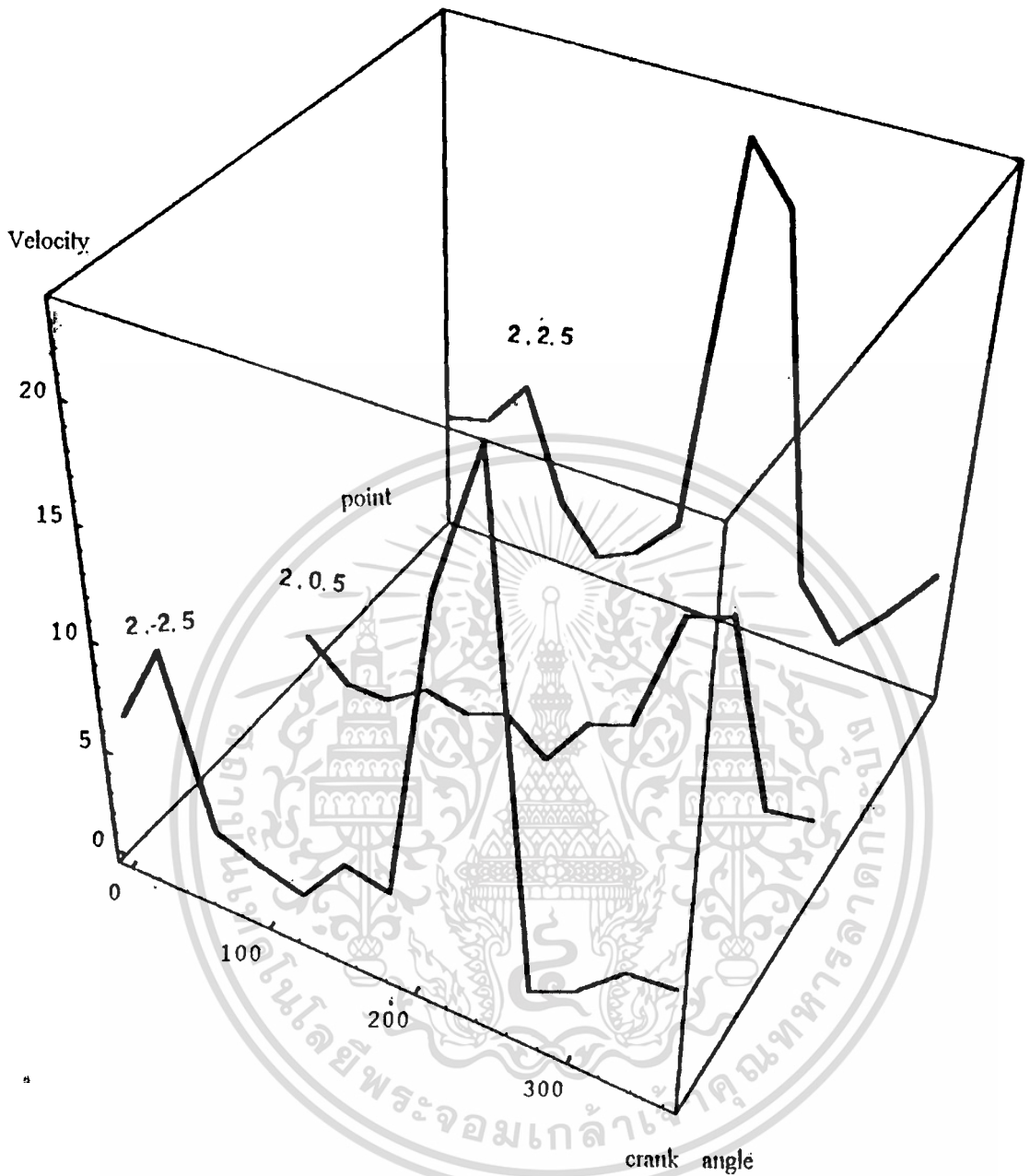
```
list3={{0,5.6412},{30,6.1294},{60,8.401},{90,3.1015},{120,0.9156},
{150,1.8869},{180,4.0561},{210,22.3441},{240,19.9861},{270,3.363},
{300,0.8869},{330,3.1674},{360,5.8490}}
```

In[29]:=

```
gtab = Table[{ListPlot[list1,PlotJoined->True],
ListPlot[list2,PlotJoined->True],
ListPlot[list3,PlotJoined->True]}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 25 รูป 3 มิติแสดงระหว่างความเร็ว มุมข้อเหวี่ยง ที่ plane ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

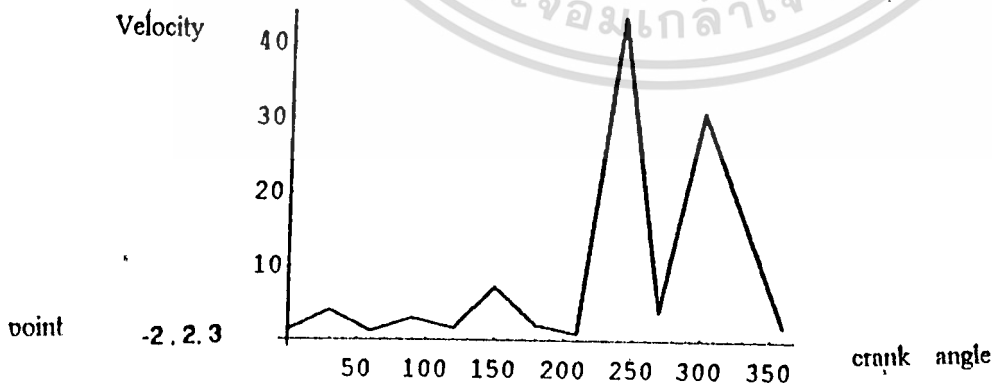
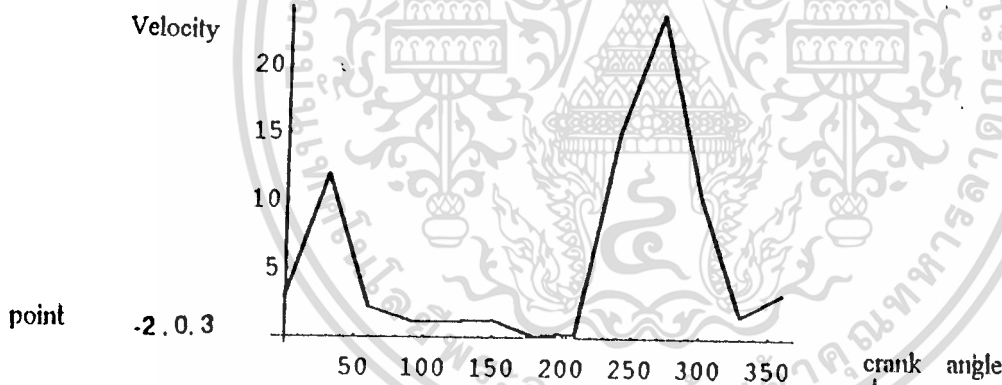
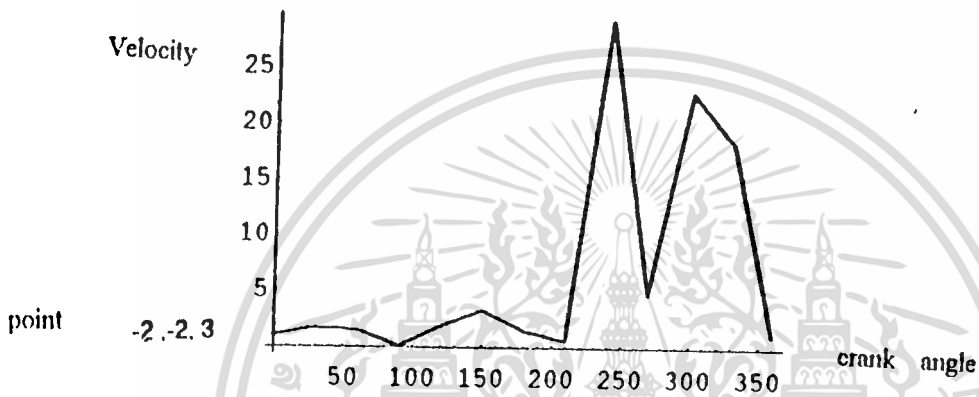
```
<<Graphics`Graphics3D`
```

```
list1-{{0,0.9879},{30,1.6879},{60,1.4306},{90,0.1353},{120,1.8771},  
{150,3.2183},{180,1.5097},{210,0.5972},{240,29.1264},{270,4.6623},  
{300,22.6761},{330,18.2113},{360,1.1254}}
```

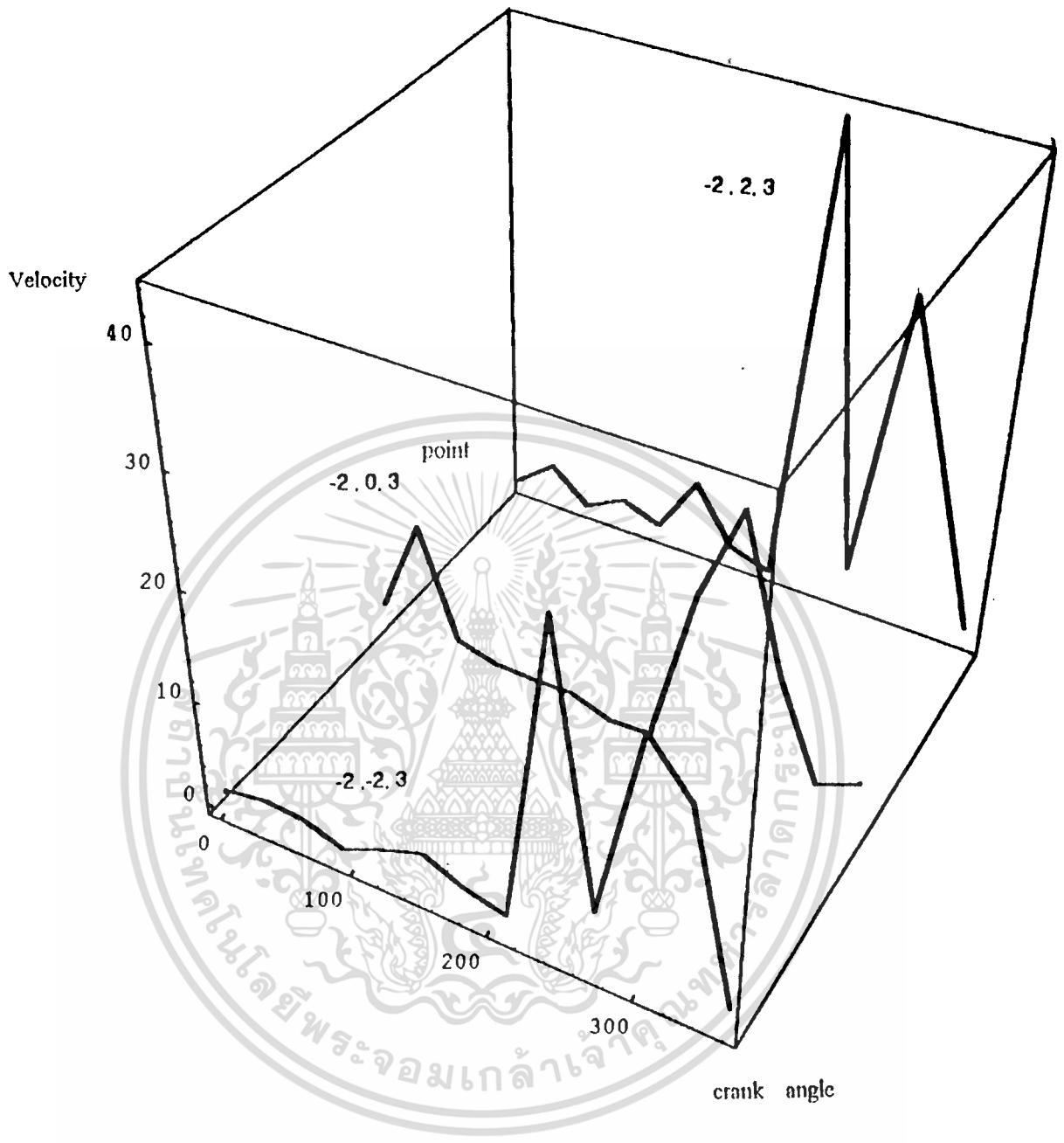
```
list2-{{0,2.9286},{30,11.8865},{60,2.1968},{90,1.2278},{120,1.1650},  
{150,1.3118},{180,0.0701},{210,0.2938},{240,15.0282},{270,23.8783},  
{300,10.4565},{330,1.5809},{360,3.3211}}
```

```
list3-{{0,1.3319},{30,4.0116},{60,1.1128},{90,3.0011},{120,1.6589},  
{150,7.2156},{180,2.0128},{210,0.8597},{240,43.4576},{270,3.8116},  
{300,30.6991},{330,16.4591},{360,1.9548}}
```

```
gtab = Table[{ListPlot[list1,PlotJoined->True],  
ListPlot[list2,PlotJoined->True],  
ListPlot[list3,PlotJoined->True]}
```

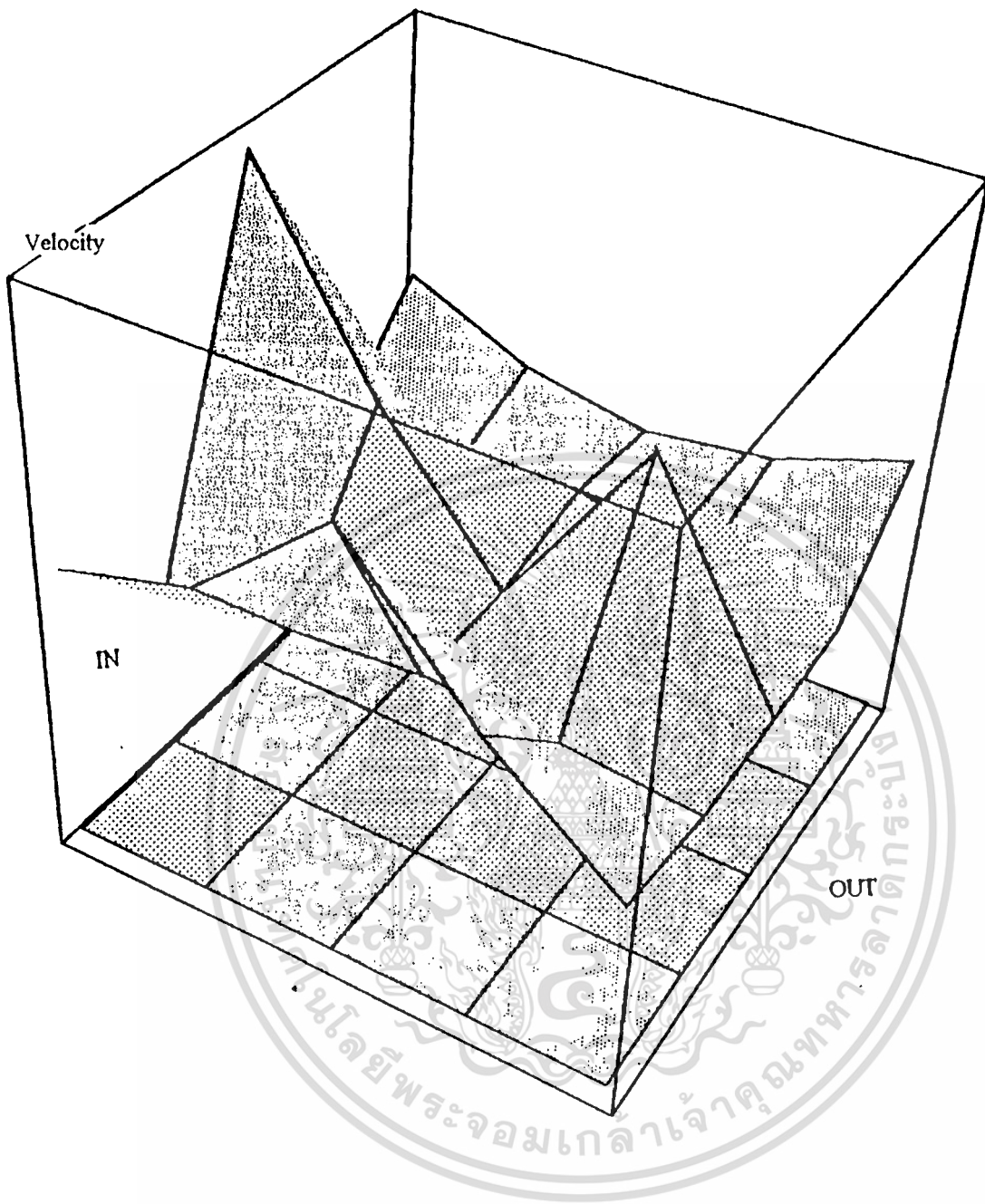


รูปที่ 26 แสดงกราฟระหว่างความเร็วและมุมข้อเหวี่ยง



รูปที่ 27 รูป 3 มิติแสดงระหว่างความเร็ว มุมข้อเหวี่ยง ที่ plane ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

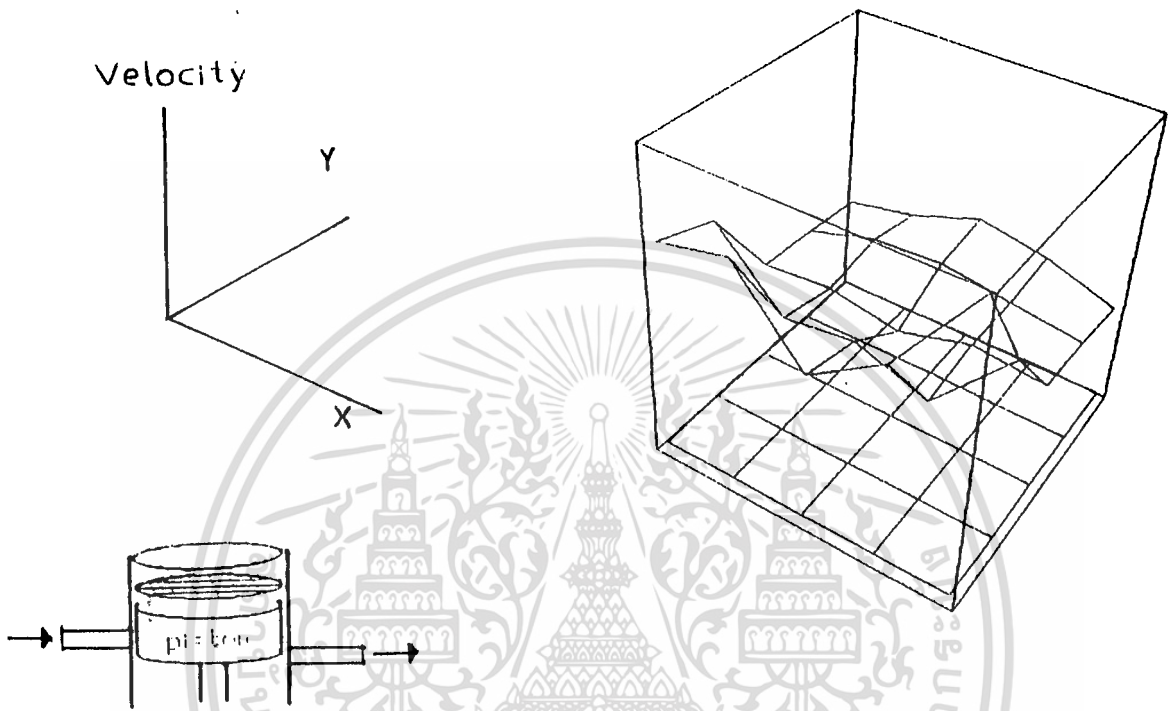


รูป 3 มิติแสดงค่าขนาดความเร็วที่ plane ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<<Graphics`Graphics3D

```
ListShadowPlot3D[{{22.6761,25.862,10.4565,19.75,38.6991},  
{18.921,5.789,7.538,2.59,18.10},  
{1.9781,3.338,0.4594,4.436,3.1194},  
{1.593,5.934,6.583,4.445,2.593},  
{0.8895,3.468,8.4565,5.932,1.0001}}]
```



ที่ $z = 1$.
crank angle = 0

โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

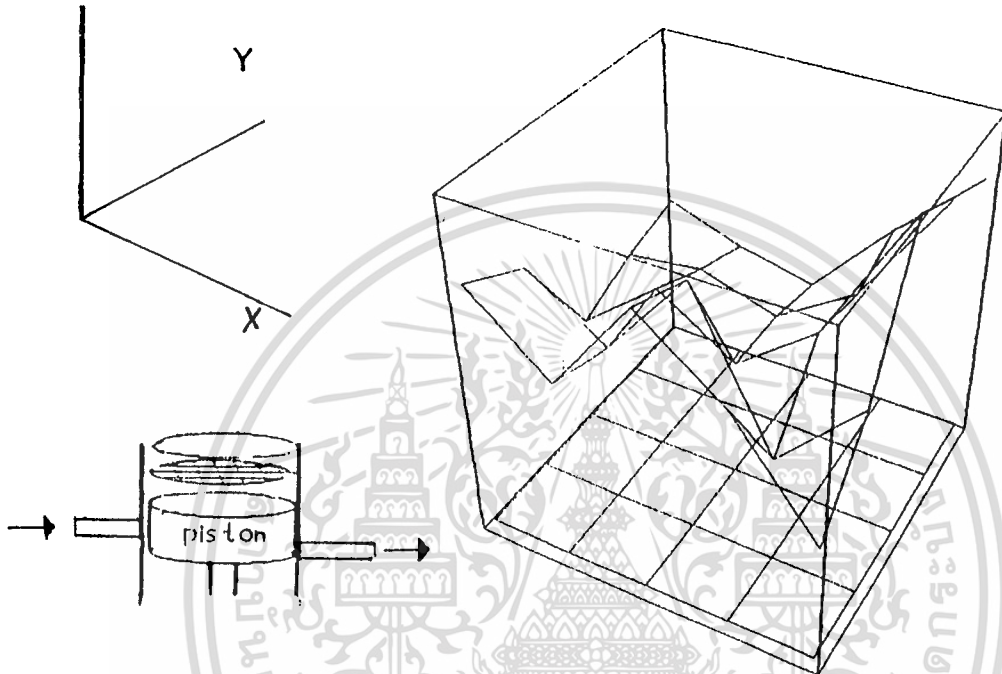
(2, 2) (2, 1) (2, 0) (2, 1) (-2, 2)
(1, 2) (1, 1) (-1, 0) (1, 1) (-1, 2)
(0, 2) (0, -1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)
(1, 2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)
(2, 2) (2, 1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
<<Graphics`Graphics3D`
```

```
ListShadowPlot3D[{{(7.3283, 3.89, 9.0741, 5.963, 0.8124),  
(5.672, 2.932, 7.801, 0.218, 4.512),  
(0.2569, 3.501, 0.8124, 4.013, 11.1693),  
(1.592, 2.125, 0.796, 3.452, 9.697),  
(2.5162, 1.021, 0.0827, 4.521, 8.401)}}]
```

Velocity



ที่ $z = 5$

crank angle = 60

โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

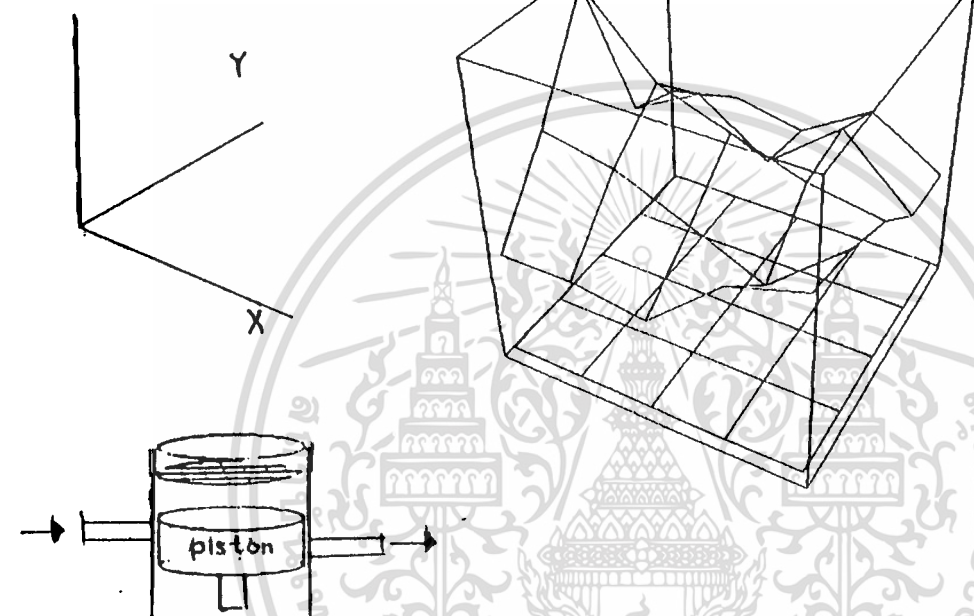
(-2, -2) (-2, 1) (2, 0) (-2, 1) (-2, 2)
(1, -2) (1, 1) (1, 0) (-1, 1) (-1, 2)
(0, -2) (0, 1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)
(1, -2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)
(2, 2) (2, 1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<<Graphics`Graphics3D`

```
ListShadowPlot3D[({{1.2442,1.382,0.2189,7.596,10.3627},  
{10.21,8.596,5.212,1.521,8.961},  
{21.5995,13.312,10.3627,7.5921,6.2551},  
{3.526,7.692,2.127,8.621,1.2921},  
{1.2442,2.753,1.0507,5.921,0.9156}})]
```

Velocity



ที่ $z = 5$

crank angle = 120

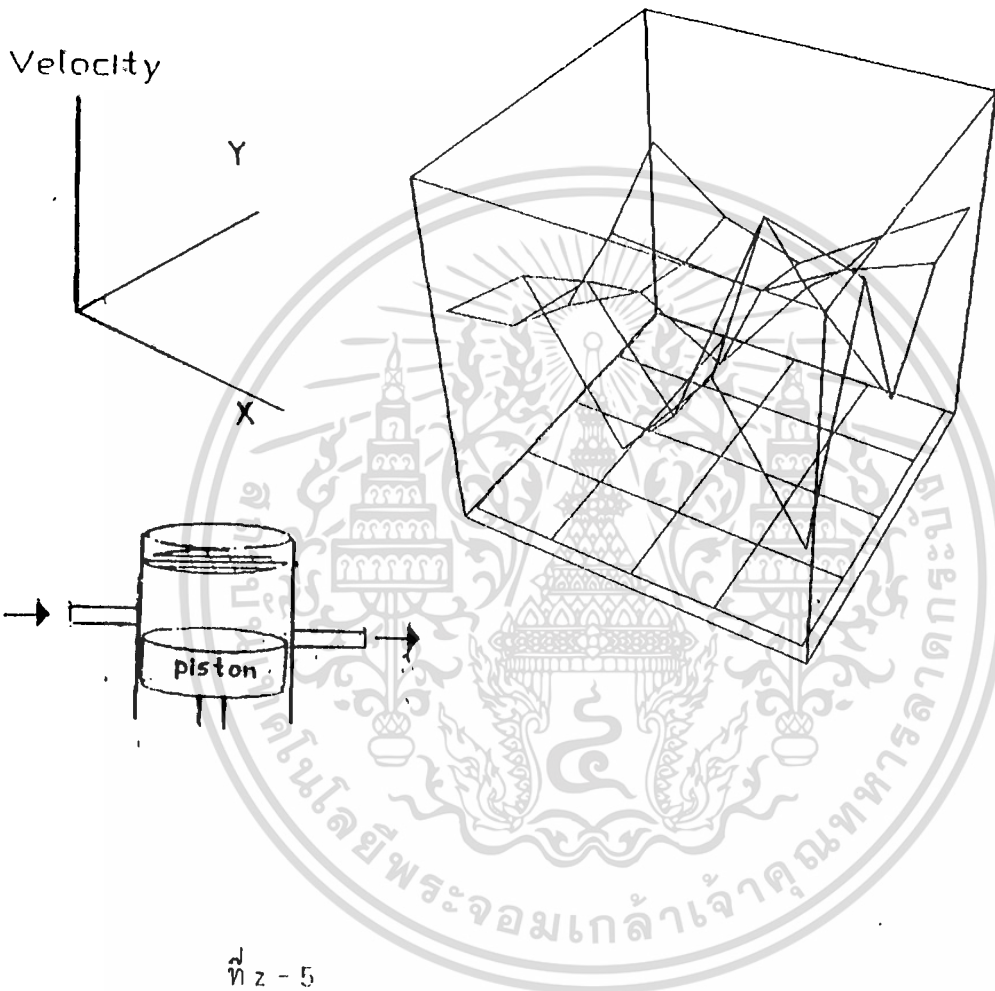
โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

(-2, -2) (2, -1) (-2, 0) (2, 1) (-2, 2)
(-1, 2) (-1, 1) (-1, 0) (1, 1) (1, 2)
(0, 2) (0, -1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)
(1, -2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)
(2, -2) (2, -1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<<Graphics`Graphics3D`

```
ListShadowPlot3D[{{3.663,5.736,1.1084,4.592,0.0864},  
{1.343,3.859,0.1121,7.592,6.735},  
{0.2681,1.732,0.0864,3.769,0.91645},  
{1.286,1.112,0.967,2.632,3.782},  
{3.2846,1.212,0.3012,2.196,4.0561}}]
```



ที่ $z = 5$

crank angle = 180

โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

$(-2, -2)$ $(-2, -1)$ $(-2, 0)$ $(-2, 1)$ $(-2, 2)$

$(-1, -2)$ $(-1, -1)$ $(-1, 0)$ $(-1, 1)$ $(-1, 2)$

$(0, -2)$ $(0, -1)$ $(0, 0)$ $(0, 1)$ $(0, 2)$

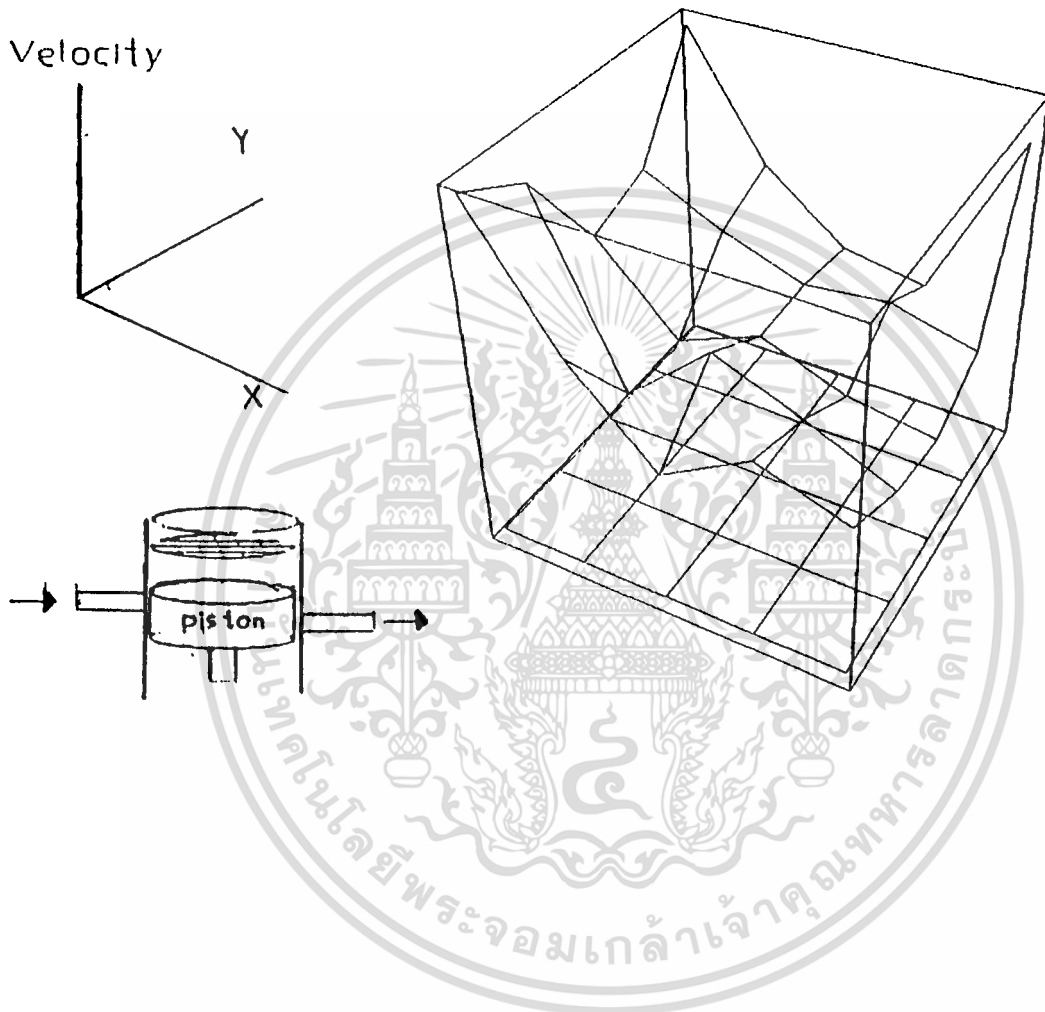
$(1, -2)$ $(1, -1)$ $(1, 0)$ $(1, 1)$ $(1, 2)$

$(2, -2)$ $(2, -1)$ $(2, 0)$ $(2, 1)$ $(2, 2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<<Graphics`Graphics3D`

```
ListShadowPlot3D[{{23.3072,10.789,2.3454,7.532,4.5869},  
                  {19.621,1.026,8.634,5.121,1.2196},  
                  {9.6097,0.952,4.5869,1.311,0.0343},  
                  {12.12,7.891,4.667,5.721,3.396},  
                  {23.072,10.521,3.6838,2.125,19.861}}]
```



ที่ $z = 5$

crank angle = 240

โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

(-2, -2) (-2, 1) (2, 0) (2, 1) (-2, 2)

(-1, -2) (-1, -1) (1, 0) (-1, 1) (-1, 2)

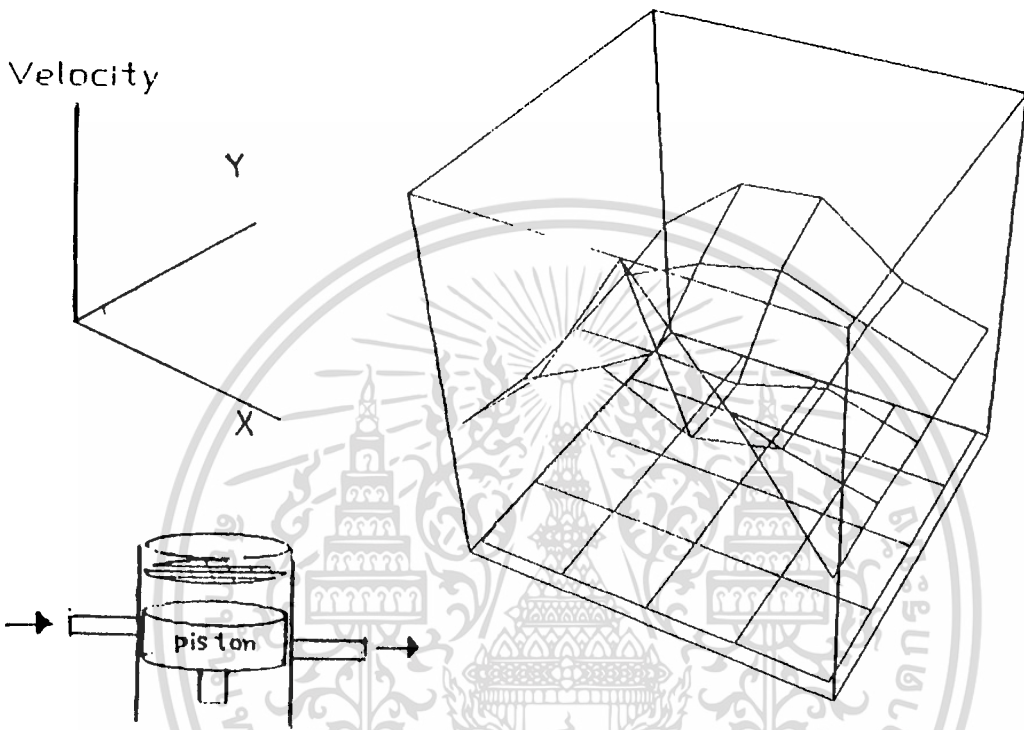
(0, 2) (0, -1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)

(1, -2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)

(2, -2) (2, -1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
<<Graphics`Graphics3D`
ListShadowPlot3D[{{2.4042,10.751,24.8123,13.895,0.7071},
{1.012,5.62,1.021,3.265,1.001},
{0.7071,1.021,0.435,3.312,0.7076},
{1.212,5.421,7.46,4.212,1.2131},
{2.4042,9.621,10.42,3.521,0.8869}}]
```



ที่ $z = 5$

crank angle = 300

โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

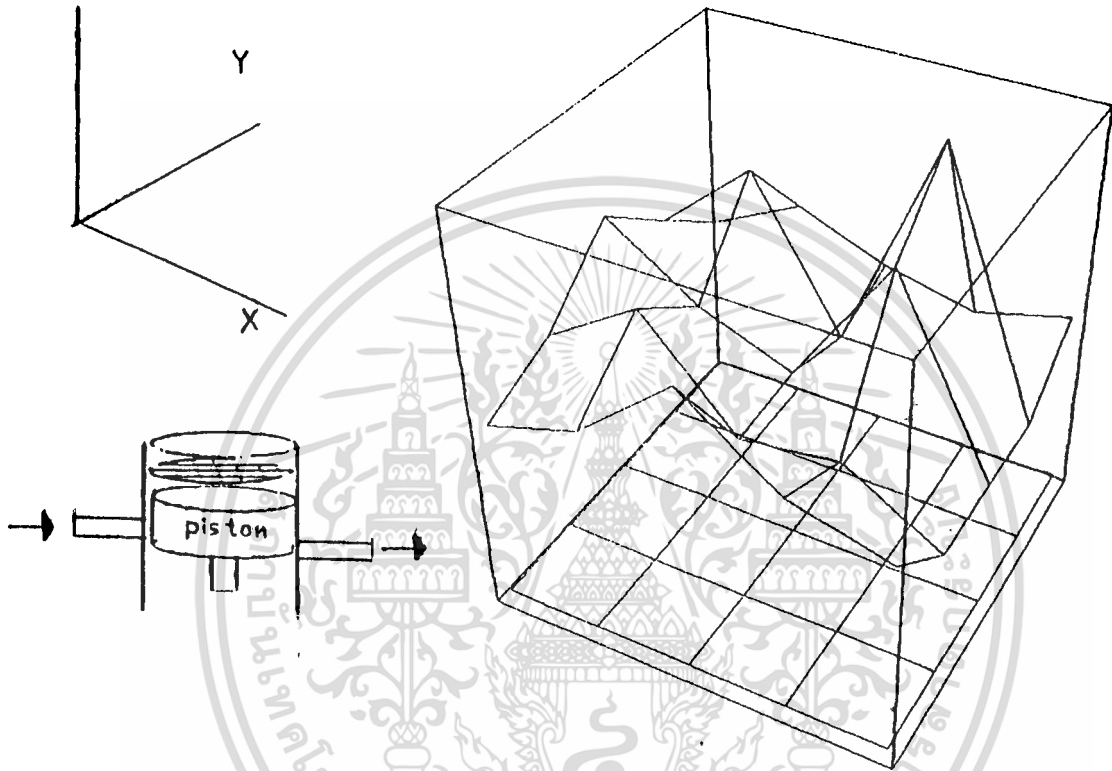
(2, 2) (-2, 1) (2, 0) (-2, 1) (-2, 2)
(1, -2) (1, 1) (1, 0) (-1, 1) (-1, 2)
(0, -2) (0, 1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)
(1, 2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)
(2, -2) (2, 1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<<Graphics`Graphics3D`

```
ListShadowPlot3D[({.9879,1.534,2.9286,1.738,1.3319,1.538,2.582,  
0.852,1.1021,0.123},{1.538,2.582,.852,1.1021,0.123},  
{2.7259,1.593,.9113,3.358,0.0976},  
{1.734,3.133,.543,4.548,.012},  
{.8131,1.595,.9286,.553,1.0015})]
```

Velocity



ที่ $z = 3$

crank angle = 0

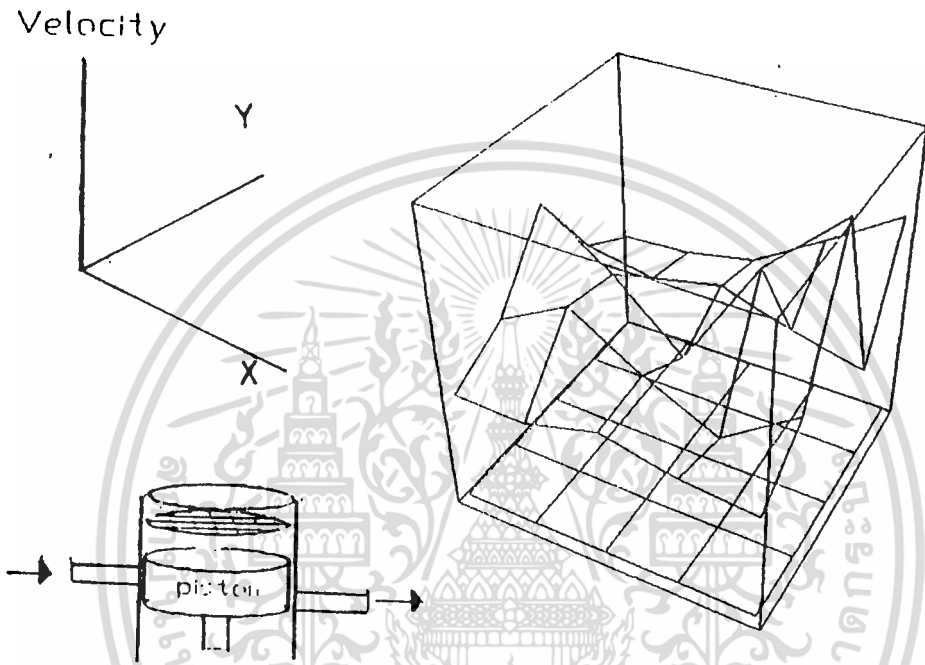
โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

(-2, -2)	(-2, -1)	(-2, 0)	(-2, 1)	(-2, 2)
(-1, -2)	(-1, -1)	(-1, 0)	(-1, 1)	(-1, 2)
(0, -2)	(0, -1)	(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)
(1, -2)	(1, -1)	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)
(2, -2)	(2, -1)	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<<Graphics`Graphics3D`

```
ListShadowPlot3D[{{(1.4306,1.35,2.9286,1.738,1.3319),  
(3.795,6.739,3.352,.548,4.592),  
(9.593,5.835,.986,9.861,15.1167),  
(3.131,2.145,3.343,1.583,.212),  
(.8218,1.131,2.1968,5.576,9.1174)}}]
```



ที่ $z = 3$

crank angle = $6(t)$

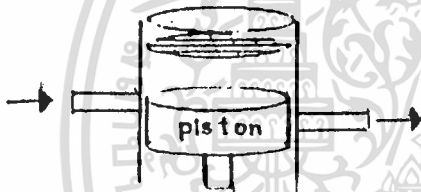
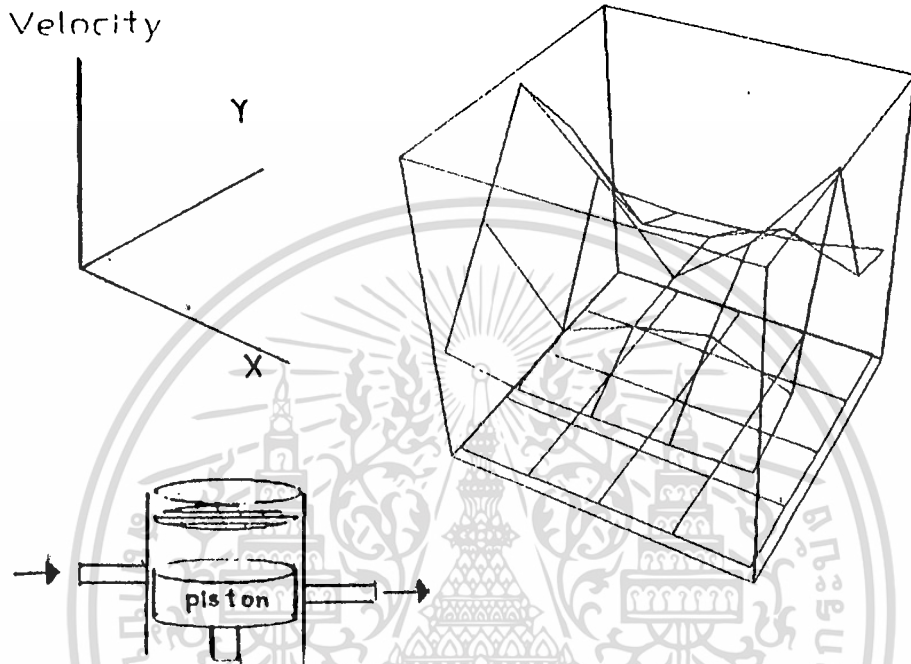
โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

(-2, -2) (2, 1) (2, 0) (-2, 1) (-2, 2)
(-1, -2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (-1, 2)
(0, 2) (0, 1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)
(1, -2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)
(2, 2) (2, 1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)

```

<<Graphics`Graphics3D`
ListShadowPlot3D[({{1.8771,0.953,1.165,1.302,1.6589},
{8.759,1.702,4.043,5.432,3.052},
{16.0843,10.5921,4.1132,8.7523,15.9118},
{9.832,3.3592,3.949,6.393,4.32},
{1.2843,0.935,1.165,1.634,2.8993}})]

```



ที่ $z = 3$

crank angle = 120

โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

$(-2, -2) (-2, 1) (2, 0) (2, 1) (-2, 2)$

$(-1, -2) (-1, 1) (1, 0) (-1, 1) (-1, 2)$

$(0, -2) (0, 1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)$

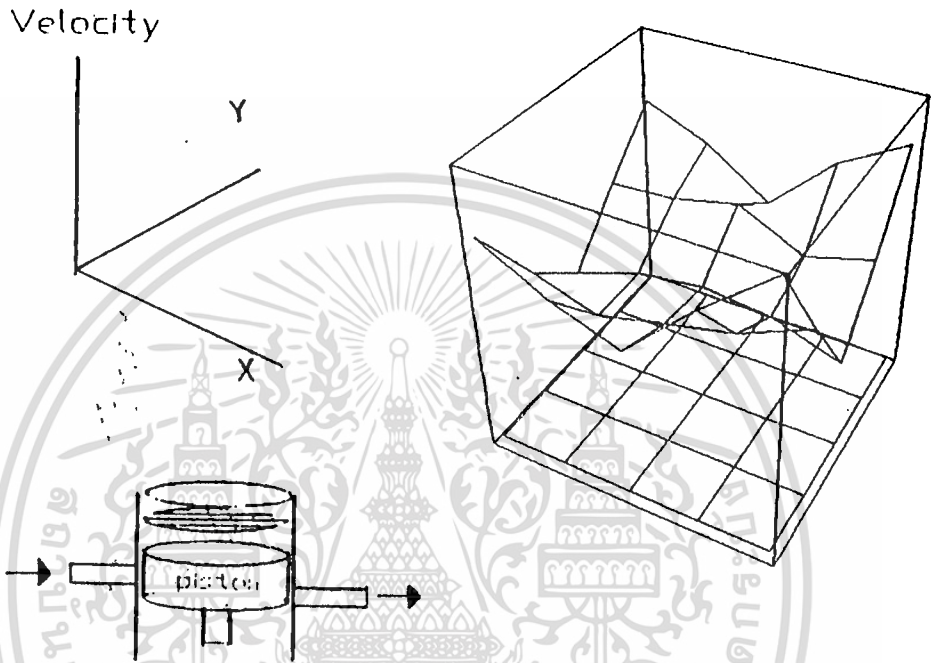
$(1, -2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)$

$(2, -2) (2, 1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)$

```

<<Graphics`Graphics3D`
ListShadowPlot3D[{{29.1268,20.592,15.0282,30.395,43.4576},
{10.598,5.928,10.152,13.852,21.12},
{0.1813,5.732,8.1174,6.595,0.9554},
{14.59,15.37,18.952,10.898,15.532},
{28.1102,21.125,10.0282,25.13,34.2105}}]

```



ที่ $z = 3$

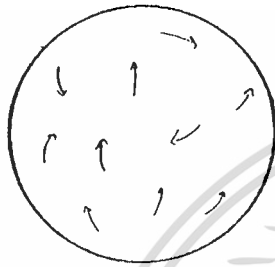
crank angle = 240

โดยที่ (x, y) จะเรียงตามลำดับดังนี้

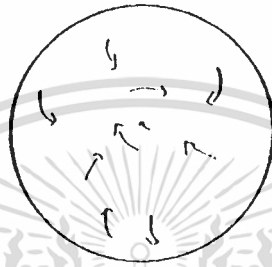
- (-2, 2) (-2, 1) (-2, 0) (-2, 1) (-2, 2)
- (-1, 2) (-1, 1) (-1, 0) (-1, 1) (-1, 2)
- (0, 2) (0, 1) (0, 0) (0, 1) (0, 2)
- (1, 2) (1, 1) (1, 0) (1, 1) (1, 2)
- (2, 2) (2, 1) (2, 0) (2, 1) (2, 2)

วิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนของการบันทึกภาพการไหล

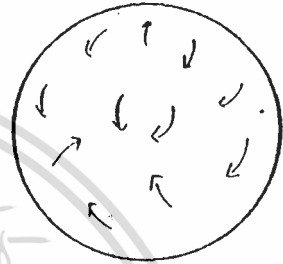
จากการพิจารณาภาพแสดงลักษณะการไหลของอนุภาคจากกล้อง v.d.o สังเกตการไหลในแต่ละระนาบการไหล ณ ตำแหน่ง crank angle ต่างๆ ที่ความเร็วรอบประมาณ 100rpm จะสามารถเห็นลักษณะการไหลในแต่ละ section ได้ดังนี้



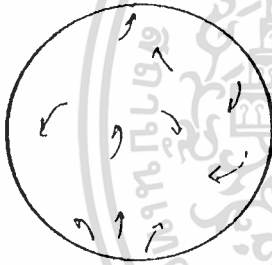
$$\theta = 30^\circ$$



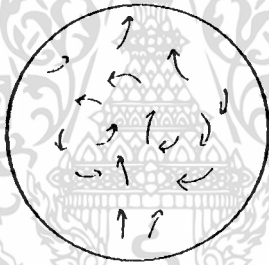
$$\theta = 90^\circ$$



$$\theta = 150^\circ$$

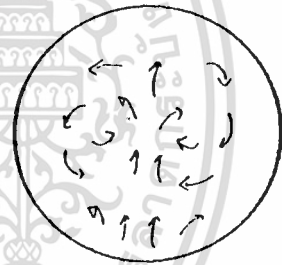


$$\theta = 210^\circ$$

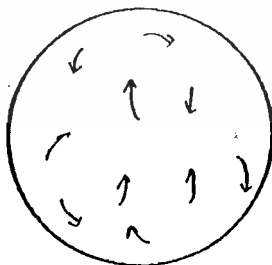


$$\theta = 270^\circ$$

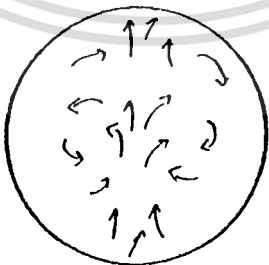
$$z = 3$$



$$\theta = 330^\circ$$

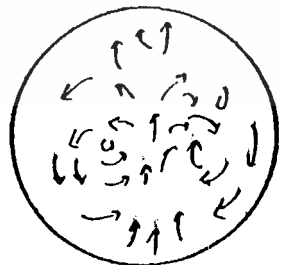


$$\theta = 210^\circ$$



$$\theta = 270^\circ$$

$$z = 5$$



$$\theta = 330^\circ$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 20 จะเห็นว่าความเร็วที่วัดได้ ณ ตำแหน่ง $(2, 0, 5)$, $(2, 2, 5)$ และ $(2, 2, 5)$ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่ crank angle ตั้งแต่ 200° และนำกราฟความเร็วทั้งสามมาเขียนเป็นรูปกราฟสามมิติ ได้ดังรูปที่ 21

รูปที่ 22 แสดงความเร็วที่วัดได้ ณ ตำแหน่ง $(0, 2, 5)$, $(0, -2, 5)$ และ $(0, 0, 5)$ ที่ crank angle ต่างๆ และสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟสามมิติได้ดังรูปที่ 23

รูปที่ 24 แสดงความเร็วที่วัดได้ ณ ตำแหน่ง $(2, -2, 5)$, $(2, 0, 5)$ และ $(2, 2, 5)$ โดยจะเห็นว่าความเร็วจะเริ่มสูงขึ้นที่ crank angle ประมาณ 180° และสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟสามมิติได้ดังรูปที่ 25

รูปที่ 26 แสดงความเร็วที่วัดได้ ณ ตำแหน่ง $(-2, -2, 3)$, $(-2, 0, 3)$ และ $(-2, 2, 3)$ โดยจะเห็นว่าความเร็วจะมีค่าสูงขึ้นที่ crank angle ประมาณ 210° และสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟสามมิติได้ ดังรูปที่ 27

จากข้างต้นจะเห็นว่า จากการวัดจะสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟ 3 มิติแสดงความเร็ว ในแต่ละ plane ได้ดังรูปสามมิติ ซึ่งจะป็นรูปแสดงรายละเอียด plane ละ 25 จุด เพื่อความละเอียดยิ่งขึ้น

วิเคราะห์ข้อผิดพลาดและปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

1. สามารถบันทึกและสังเกตภาพการไหลได้เฉพาะช่วงความเร็วไม่สูงนักเมื่อเราใช้ความเร็วรอบสูงๆ กล้อง v.d.o จะไม่สามารถจับภาพการไหลได้
2. การทำงานของ FIV เมื่อทำการทดลองไปประมาณ 4-5 ชั่วโมงหลังจากนั้นเครื่องจะให้ผลที่มีค่าผิดปกติ จึงต้องพักการทดลอง
3. ไม่สามารถวัดความเร็ว ณ บางตำแหน่งทางเข้าได้เนื่องจากเกิดไอน้ำมาจับที่บริเวณ ผ่าสุบใส ทำให้เกิดการหักเหของแสงเลเซอร์

สรุปผลการทดลอง

การสังเกตการไหลในกระบอกสุบของเครื่องยนต์สองจังหวะโดยการถ่ายภาพการไหลของอนุภาคทางด้านบนของกระบอกสุบใสที่ได้จำลองขึ้นเพื่อการทดลองนี้ และวัดความเร็วของอนุภาคที่ไหลในกระบอกสุบ โดยใช้เครื่อง FIV สามารถสุบได้ดังนี้

- 1 จากผลการทดลองสามารถวัดความเร็วของอนุภาคในแต่ละตำแหน่งที่องศาต่างๆของข้อเหวี่ยง ด้วยเครื่อง FIV และมาเป็นภาพสามมิติได้

2. ทิศทางการไหลของอนุภาคสามารถตรวจจับได้ด้วยกล้องวิดีโอ
3. จากผลการทดลองทำให้เราทราบว่าลักษณะการไหลเป็นแบบหมุนวน
4. ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ port ทางเข้า และความเร็วสูงสุดอยู่ที่ plane ตรงกลาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายชื่อเอกสารอ้างอิง

1. Heywood , J.B. " Fluid Motion with in the cylinder of Internal Combustion Engine. The 1986 Freeman Scholar lecture ."Journal of Fluid Engineering , Vol 109/3, March 1987.
2. Numerical Simulations of Three-Dimentional flows in a Cubic Cavity with an Oscillating Lid from Transactions of the ASME.
3. YasuHiko Iwamoto, Yoshiaki Danno, Osamu hirako, Toyoaki, Fukui and Nobuaki Murakami, "The 1.5 liter Vertical vortex engine" SAE paper 920607,1992.
4. Tadayoshi Hirotoni, isao Nagayama, and Shoji Kobayashi(Nissan), " Study of Induction Swirl in a Spark Ignition -Engine" SAE paper 810496, 1981.
5. Yohiko, K oyota, Katsu Akishino, and Hironitsu Ando "Concept of Lean Combustion by Barrel- Startification" SAE paper 92678, 1992.

