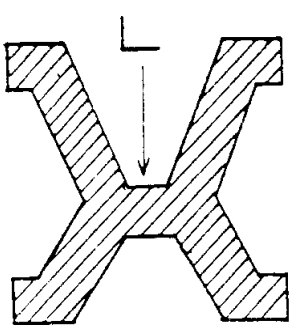
บทที่ 4
การวัดความยาว

4.1 นิยามหน่วยรากฐานความยาว

มาตรวิทยาเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณต่างๆ หลายแขนงด้วยกัน เช่น มวล ความยาว แรง ความดัน ไฟฟ้า ความถี่ อุณหภูมิ เสียง และวัสดุอ้างอิง เพื่อรักษาความเป็นมาตรฐานและการถ่ายความถูกต้องไปยังระดับต่างๆ

หน่วยรากฐานของความยาว คือ **เมตร** ซึ่งเป็นหน่วยหนึ่งในระบบ SI กำหนดโดย CGPM (General Conference on Weights and Measures) มาตรฐานความยาวระหว่างประเทศอันแรกที่แท้จริง คือ แท่ง (bar) ของโลหะผสม (โดยน้ำหนัก) ระหว่างแพลทตินัม กับ 10% อิริเดียม ซึ่งเรียกว่า **มาตรฐานเมตร** (standard meter) ได้เก็บรักษาไว้ที่สถาบันน้ำหนักและการวัดระหว่างประเทศ (International Bureau of Weights and Measures) ใกล้กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส ปี ค.ศ. 1889 เป็น line standard ซึ่งมีความยาว 1 เมตร เป็นแท่งโลหะลักษณะเป็นรูป X ดังรูปที่ 4.1



รูป 4.1 Cross section of the Standard meter bar in 1889

ต่อมามีเหตุผลหลายประการที่คัดค้านแท่งเมตรเป็นมาตรฐานปฐมภูมิความยาว

มันอาจถูกทำลายด้วยไฟหรือสงคราม เป็นภาพจำลองที่ไม่ถูกต้องและไม่เป็นที่ยอมรับ ที่สำคัญที่สุดความถูกต้องที่จำเป็นในการเปรียบเทียบความยาวระหว่างกัน-ซึ่งวัดด้วยไมโครมิเตอร์นั้น ไม่สามารถใช้ได้ในวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ ความถูกต้องมากที่สุดที่ยอมรับได้ของมาตรฐานเมตรในการอ้างอิง คือ 1×10^{-7}

ในปี ค.ศ. 1864 Hippolyte Louis Fizeau ได้แนะนำครั้งแรกว่าความยาวของคลื่นแสงจะใช้เป็นมาตรฐานความยาว ในอเมริกา A.A. Michelson ได้พัฒนา interferometer ที่มีชื่อเสียงของเขา และพิสูจน์ว่ามันเป็นไปได้ที่จะใช้รากฐานของหน่วยระหว่างประเทศของความยาวบนความยาวคลื่นของการแผ่รังสีเอกรงค์ที่เลือกได้ ซึ่ง Fabry และ Perot ก็ได้พบงานอย่างเดียวกันในฝรั่งเศส

ความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่มองเห็นได้ คือ ประมาณ 5×10^{-7} เมตร และการวัดความยาวสามารถทำได้ที่เศษส่วนเล็กมาก (very small fraction) ของความยาวคลื่น ความถูกต้องของ 10^{-9} ในการเปรียบเทียบความยาวระหว่างกันโดยใช้คลื่นแสงจะเป็นไปได้ โดยความพยายามที่จะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ดีที่สุด ในเดือนตุลาคม ค.ศ. 1960 The International General Conference on Weights and Measures ก็ได้นิยามหน่วยของความยาวขึ้นใหม่ ในเทอมของความยาวคลื่นของคริปตอน-86 (Kr-86) และยกเลิกมาตรฐานแท่งเมตรระหว่างประเทศ (international standard meter bar)

ในการประชุมครั้งที่ 11 ปี ค.ศ. 1960 จึงได้นิยาม **เมตร** ว่า เป็นความยาวที่เท่ากับ 1 650 763. 73 เท่าของความยาวคลื่นในสุญญากาศของการแผ่รังสีที่สมนัยกับการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับ $^{2}p_{10}$ กับ $^{5}d_{5}$ ของอะตอมคริปตอน-86

ในการประชุมครั้งที่ 12 ปี ค.ศ. 1964 ของ CGPM ได้มีการแนะนำให้ใช้สเปกตรัมเส้นอื่นๆ ของ Krypton-86, Mercury-198 และ Cadmium-114 เป็นมาตรฐานรองทางด้านความยาว

ต่อมาได้มีการแนะนำว่ามาตรฐานทั้งหมดรวมถึง ความยาว มวล และอุณหภูมิควรจะได้นิยามใหม่ โดยเชื่อมให้มีมาตรฐานที่ถูกต้องที่สุด นั่นคือ เวลา ซึ่งมีความถูกต้อง

ถึง 10^{-13} ดังนั้นในการประชุมครั้งที่ 17 ของ CGPM ในเดือนตุลาคม ปี ค.ศ. 1983 จึงได้กำหนดความยาวมาตรฐานระหว่างประเทศขึ้นใหม่ ว่า **เมตร คือ ระยะทางที่แสงเดินทางไปได้ในสุญญากาศในระหว่างช่วงเวลาของ 1/299 792 458 เท่าของวินาที** (The meter is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of 1/299 792 458 of a second.) ซึ่งหมายความว่า ความเร็วของแสง (C) ในสุญญากาศขณะนั้น คงตัวเท่ากับ 299 792 458 เมตรต่อวินาที

$$C = f\lambda$$

$$\lambda = C/f$$

ซึ่ง C = ความเร็วของแสง

f = ความถี่

λ = ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

สรุป ประวัตินิยามของเมตร มีดังนี้

ปี ค.ศ. 1889-1960 แท่งเมตรทำด้วยโละแพลทตินัม-อิริเดียม

ปี ค.ศ. 1960-1983 ความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัม (สีส้ม) ของคริปตอน-86

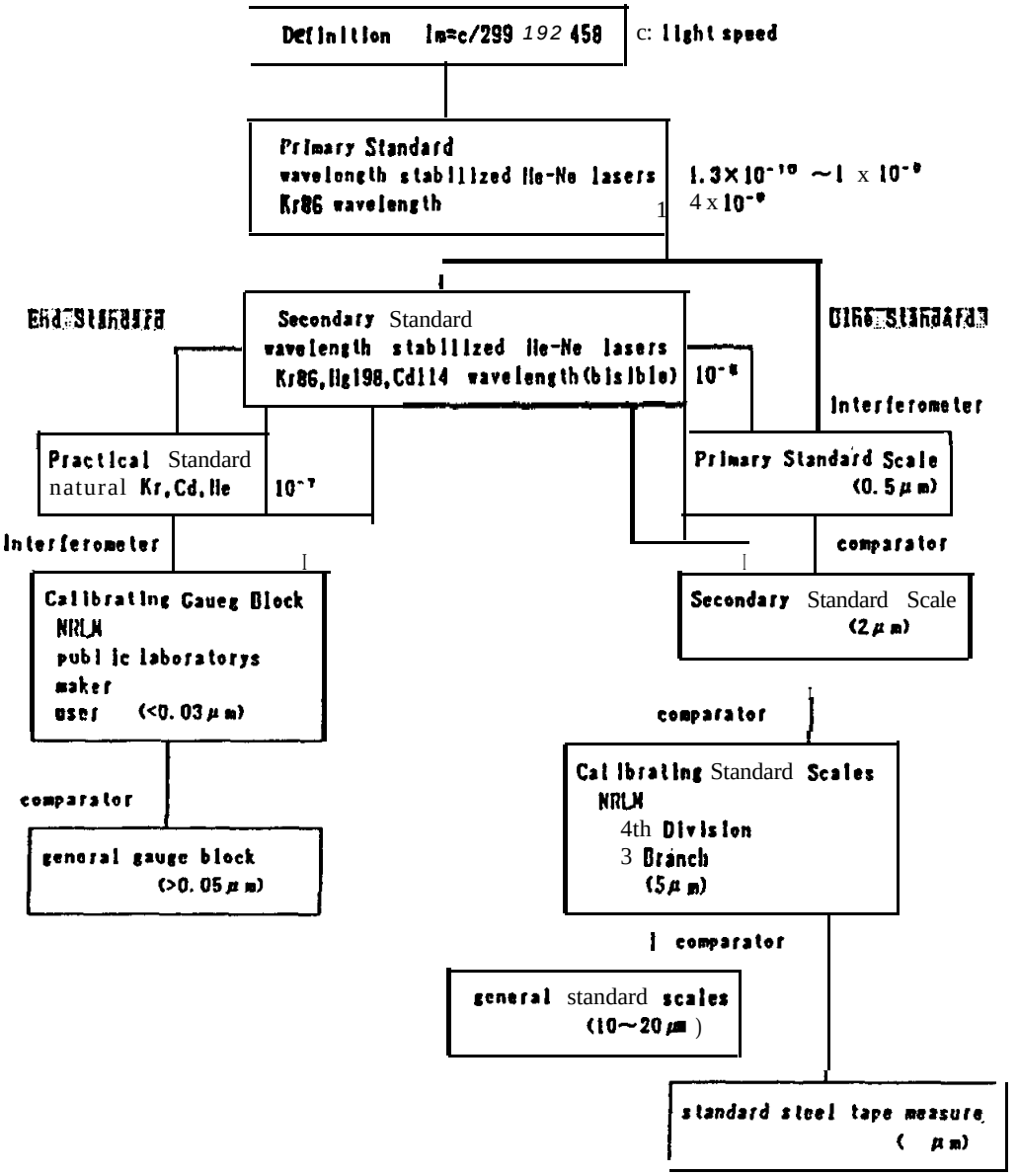
ปี ค.ศ. 1983 - ระยะทางที่แสงเดินทางไปได้ในสุญญากาศในระหว่างช่วงเวลาของ 1/299 792 458 เท่าของวินาที

4.2 มาตรฐานความยาว

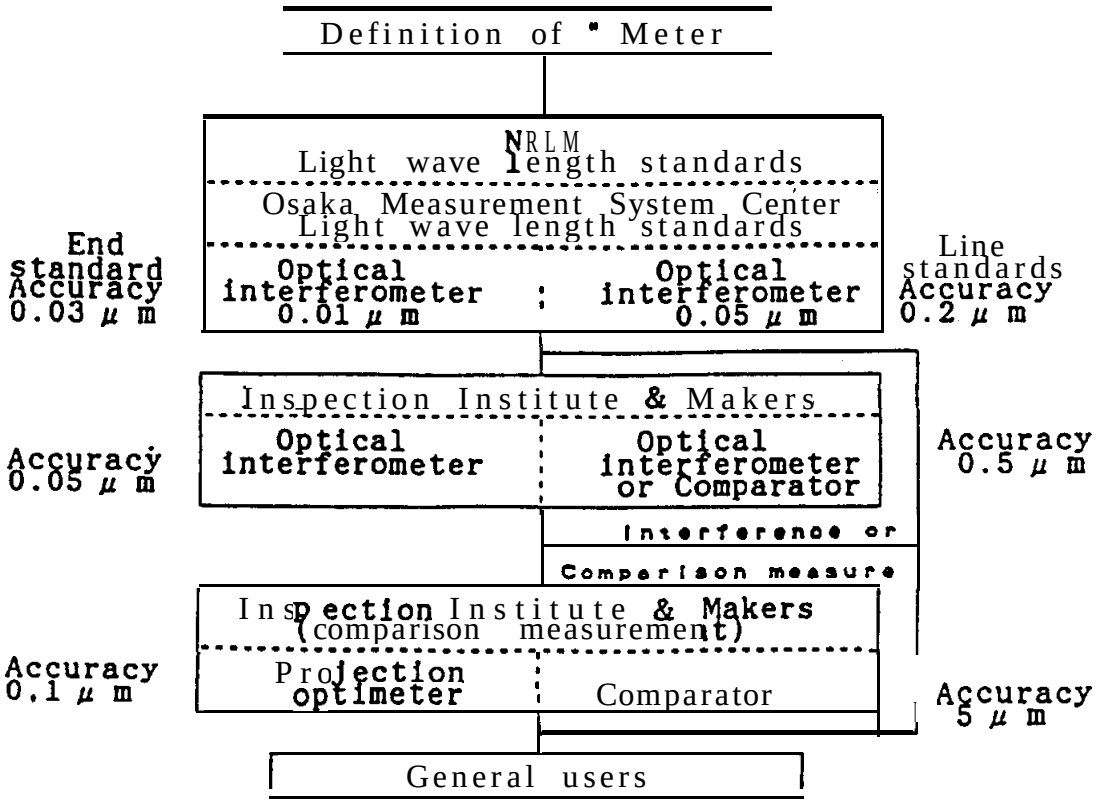
การวัดความยาวในทางปฏิบัติทางด้านวิศวกรรมการผลิต เป็นมาตรฐานความยาวกล ได้แก่ **line standard** เป็น line scale และ **end standard** เป็น gauge block ซึ่งใช้กับเครื่องมือวัดความยาวหรือเครื่องยนต์ มาตรฐานเหล่านี้ถูกสอบเทียบในเทอมของความยาวของแสงของมาตรฐานปฐมภูมิหรือมาตรฐานทุติยภูมิ โดยใช้สเปกตรัมของ Kr-86, Hg หรือ Cd ซึ่งจะใช้เครื่อง Optical Interferometer โดยจะแปลงความยาวคลื่นแสงเป็นความยาวกล

แผนภูมิในรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 จะเกี่ยวกับมาตรฐานความยาว และการถ่าย

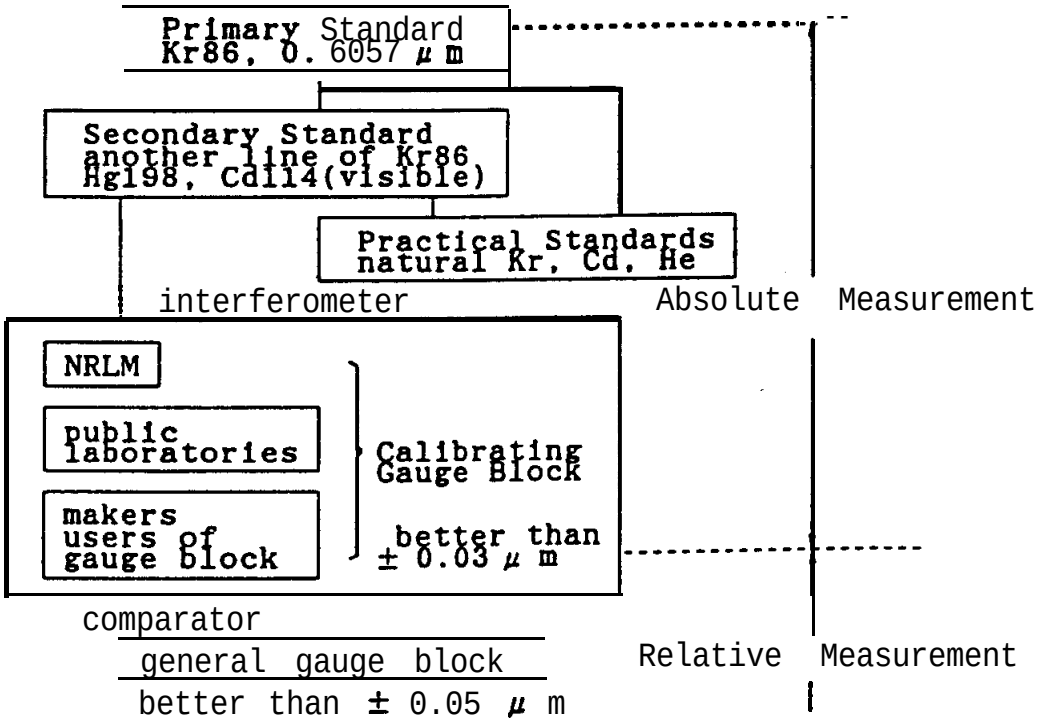
ระบบความถูกต้อง (traceability) ในระบบต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานสากลด้านมาตรวิทยาการวัดความยาวของแท่งเทียบ (gauge block) และ line standard



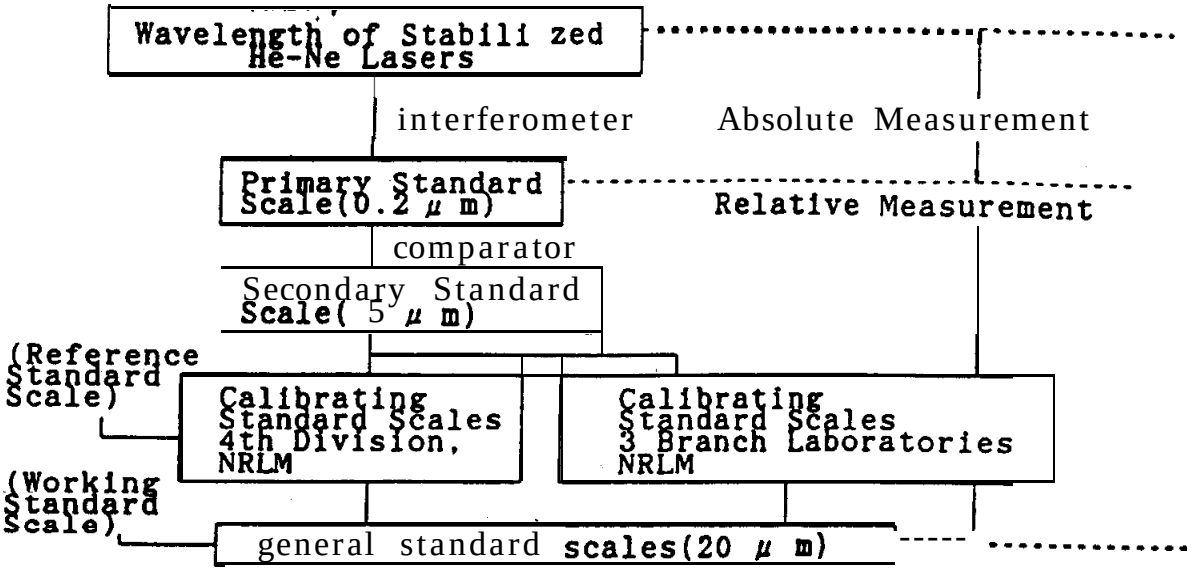
รูป 4 . 2 Length Standard



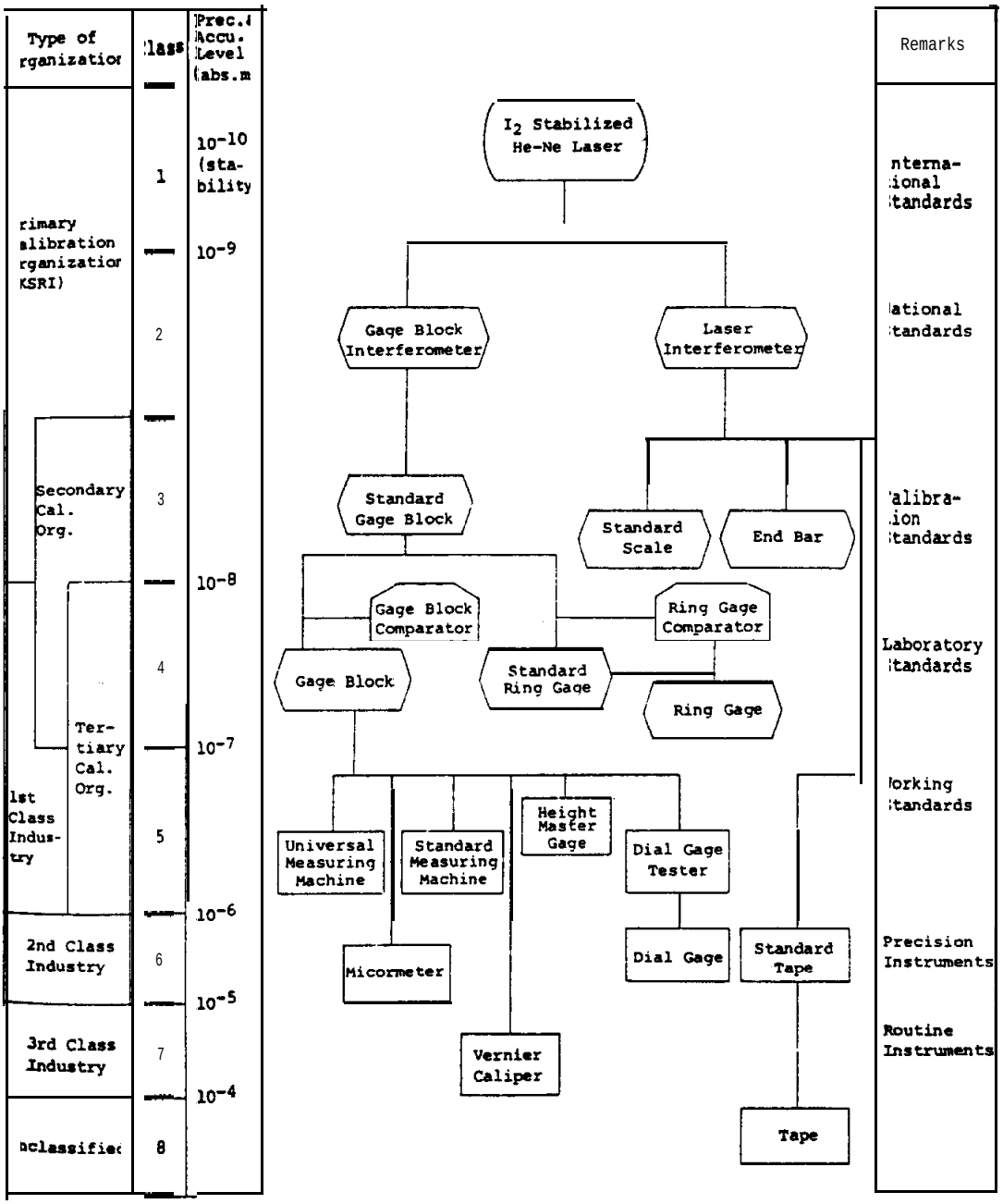
รูป 4.3 Traceability of Length Standard



รูป 4.4 Flow chart of length standard for gauge block



รูปที่ 4.5 Flow chart of length standard for line standards



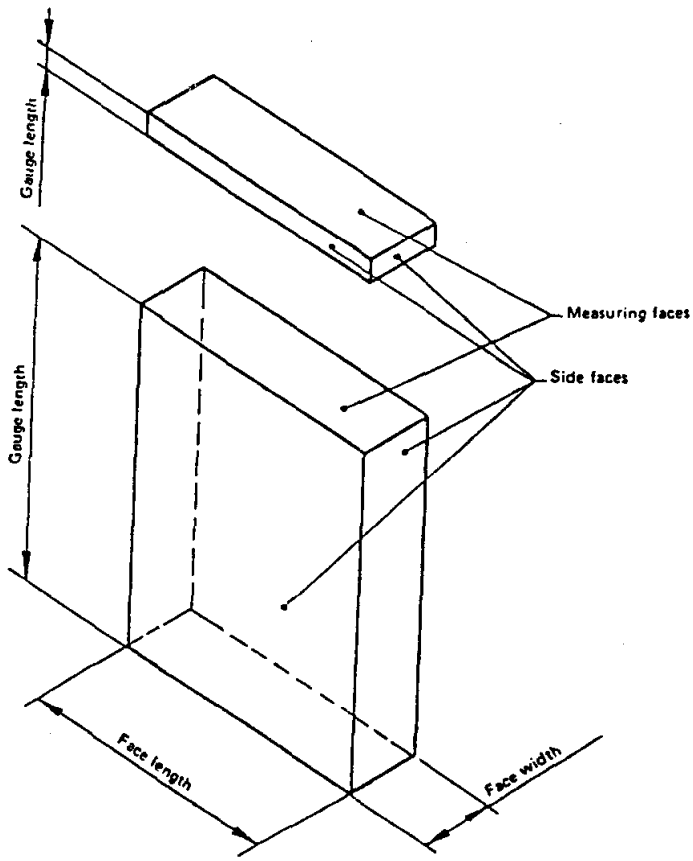
รูปที่ 4.6 Length Standards Calibration Flow Chart

ตารางที่ 4.1 *Measurement Capability for Calibration* **of** *Length Standards*

Parameter	Equipment	Range	Accuracy	Trace-ability	Remarks
Length Standard	- I_2 Stabilized He-Ne Laser		10^{-10} (stability)	KSRI (BIPM)	
Length (Line Standard)	- Laser Interferometer	0-10 mm	0.1 μm	KSRI	
		0-1 m	2 μm		
		1-50 m	(1+L)μm L: in m		
Length (End Standard)	- Gage Block Interferometer	0-100 mm	0.02 μm	KSRI	
		100-250 mm	0.04 μm		
	- Electromechanical Comparators - Gage Blocks	1-500 mm	(0.03+0.3L) μm L: in m		
Flatness	- Monochromatic Light (He) - standard Optical Flat (6")	0-150 mm (diameter)	0.06 m	KSRI	
Angle	- Autocollimator - Indexing Table - Angle Gage Block	$0-360^c$	0.2 arc-second	KSRI	
Roughness	- Stylus Type Roughness Tester - Standard Roughness specimen	350 μm (Ra)	5%		
Roughness	- Stylus Type Roundness Tester - Standard Hemisphere	Diameter : 1-350 mm Roundness 500 μm	5%		
Diameter	- Electromechanical Comparator - Standard Ring Gage	0-100 mm	0.3 μm	KSRI	
		100-300 mm	μm		

4.2.1 มาตรฐานแท่งเทียบ

แท่งเทียบ (Gauge block) ใช้เป็นมาตรฐานความยาวอ้างอิง มีรูปเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก สี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำจากวัสดุที่แข็งแรงทนทาน ประกอบด้วยผิวหน้าที่เรียบและขนานซึ่งกันและกันคู่หนึ่ง ผิวหน้า (measuring face) มีความสำคัญมากสำหรับการประกบ (wring) ของชิ้นความหนาเข้าด้วยกัน ความยาวของชิ้นความหนาเปลี่ยนไปขึ้นกับอุณหภูมิ โดยมีอุณหภูมิอ้างอิง คือ 20°C



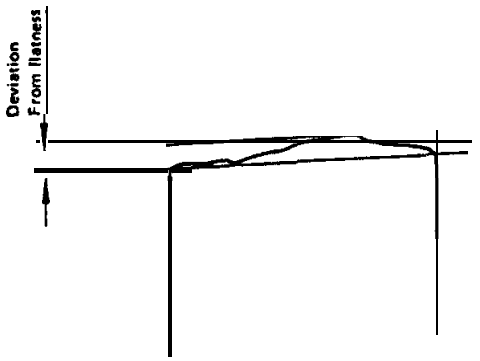
รูปที่ 4.7 แท่งเทียบ

1. **ความยาวของแท่งเทียบ** (length of a gauge block) ความยาว

ของแท่งเทียบมาตรฐานที่จุดใดๆ บนผิวหน้า คือ ระยะที่ตั้งฉากระหว่างจุดนั้นๆ กับพื้นผิวที่แท่งเทียบนั้นประกบอยู่ ดังรูปที่ 4.7

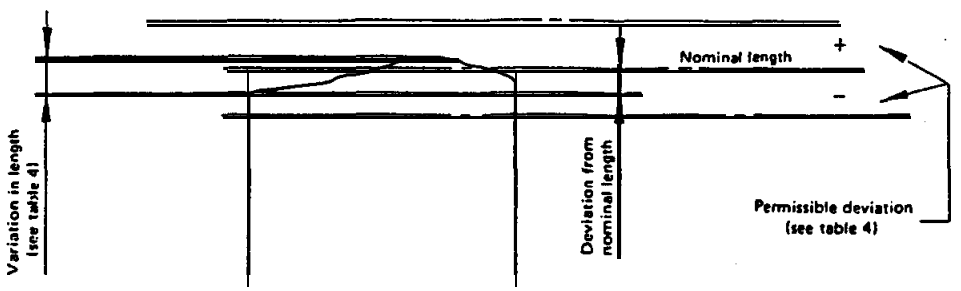
2. **ความยาวที่จุดกึ่งกลางของชิ้นความหนา** (central length) คือ ความยาวของแท่งเทียบมาตรฐาน ณ จุดกึ่งกลางของผิวหน้าการวัด (measuring face)

3. **ส่วนเบี่ยงเบนจากความเรียบ** (deviation from flatness) คือ ระยะทางที่น้อยที่สุดระหว่างผิวหน้าที่ขนานกัน ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8

4. **ความผันแปรในความยาว** (variation in length) คือ ผลต่างของความยาวของชิ้นความหนาระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดที่ทุกๆ จุดบนผิวหน้าของชิ้นความหนา ดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.9

5. **การประกบติด** (wringing) เป็นคุณสมบัติของผิวหน้าของแท่งเทียบที่สามารถติดแน่นกับแผ่นรองรับด้วยแรงเกาะยึด (molecular force)

6. **เกรดของชิ้นความหนา** (Grade of gauge block) แท่งเทียบมาตรฐานแบ่งระดับความถูกต้องออกเป็น 4 ระดับตามความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนี้

6.1 grade 00

6.2 grade 0

6.3 grade 1

6.4 grade 2

ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 Variation in length of gauge block

Range of nominal length mm		Tolerances and permissible variation, um							
		Grade 00		Grade 0		Grade 1		Grade 2	
over	up to and including	Tole*	Perm*	Tole*	Perm*	role*	Perm*	Tole*	Perm*
	10	±0.06	0.05	±0.12	0.10	±0.20	0.16	±0.46	0.3C
10	25	±0.07	0.05	f0.14	0.10	±0.30	0.16	f0.60	0.3C
25	50	f0.10	0.06	±0.20	0.10	±0.40	0.18	±0.80	0.3C
50	75	±0.12	0.06	±0.25	0.12	±0.50	0.18	fl.OO	0.3ᵹ
75	100	±0.14	0.07	to.30	0.12	±0.60	0.20	Cl.20	0.35
100	150	LO.20	0.08	LO.40	0.14	±0.80	0.20	±1.60	0.4C
150	200	±0.25	0.09	±0.50	0.16	±1.00	0.25	f2.00	0.4C
200	250	±0.30	0.10	±0.60	0.16	±1.20	0.25	±2.40	0.4ᵹ
250	300	±0.35	0.10	±0.70	0.18	±1.40	0.25	f2.80	0.X
300	400	±0.46	0.12	±0.90	0.20	±1.80	0.30	f3.60	0.5C
400	500	±0.50	0.14	±1.10	0.25	±2.20	0.35	±4.40	0.6C
500	600	±0.60	0.16	±1.30	0.25	±2.60	0.40	±5.00	0.7C
300	700	±0.70	0.18	±1.50	0.30	±3.00	0.45	t6.00	0.7C
700	800	±0.80	0.20	±1.70	0.30	±3.40	0.50	±6.50	0.8C
300	900	±0.90	0.20	±1.90	0.35	f3.80	0.50	t7.50	0.9C
300	1000	±1.00	0.25	±2.00	0.40	f4.20	0.60	f8.00	1.OC

หมายเหตุ Tole* หมายถึง Tolerances on nominal length at any point

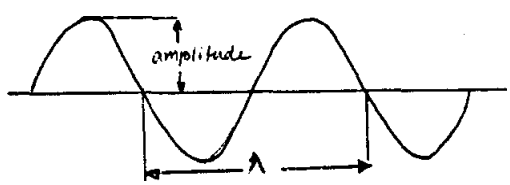
Perm* หมายถึง Permissible variation in length

4.2.2 มาตรฐานความยาวโดยใช้คลื่นแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) คลื่นแสงจะสั้นกว่าคลื่นวิทยุมาก คลื่นแสงจะมีความยาวแตกต่างกันไปตามสี แสงที่ผ่านตัวกลางเป็นสเปกตรัมเปลี่ยนเป็นสีออกมา สีแดงจะมีความยาวคลื่นแสงเป็นสองเท่าของสีม่วง แสงสีขาวที่เราเห็นคือแสงรวมทั้งหมดของสเปกตรัม แต่ละสีจะมีความยาวคลื่นต่างกันตามคุณสมบัติของมัน สีแดงจะยาวที่สุด สีม่วงจะสั้นที่สุด แสงที่มีความยาวคลื่นเดียว เรียกว่า Monochromatic light แสงที่มีความยาวคลื่นแสงเปล่งออกมาสีเดียว เรียกว่า Single color

โดยปกติแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง เมื่อมันผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ น้ำ แก้ว มันจะหักเหหรือสะท้อนกลับ แต่ในขณะที่ผ่านแท่งแก้ว (optical flat) ที่มีความหนาและเรียบมากๆ ลำแสงจะหักเหทะลุผ่านออกไปเป็นลำแสงขนานไปในทิศทางเดียวกัน เพราะการหักเหผ่านความหนาของแก้วจะหักลบกันพอดี ความเร็วของแสงจะเปลี่ยนตามตัวกลางที่ผ่าน แสงเดินผ่านแก้วจะช้ากว่าแสงที่ผ่านอากาศด้วยอัตราประมาณ 2:3

$$\frac{\text{ความเร็วของแสงที่ผ่านแก้ว}}{\text{ความเร็วของแสงที่ผ่านอากาศ}} = \frac{2}{3}$$



รูปที่ 4.10

ลำแสงที่พุ่งผ่านแก้วมีอยู่สองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งลำแสงเดิมซึ่งแสงจะอ่อนกว่า อีกส่วนหนึ่งคือลำแสงจากการถูกหักเหออกไป แต่เมื่อผ่านความหนาของแก้วแล้วจะคู่ขนานไปกับลำแสงเดิมอันแรก แต่แสงจะเข้มกว่า โดยหลักการที่ว่าถ้าใช้แสงที่มีขนาดความยาวคลื่นเท่ากัน จัดให้เป็นลำแสงเส้นเดียว นำมาทับกันให้อยู่ในเฟส (phase) เดียวกัน หรือแบบ "in phase" จะได้ความสูงของคลื่นแสง (amplitude) เป็นสองเท่า แสงจะสว่าง แต่ในทางกลับกันถ้าแสงอยู่คนละเฟสหรือแบบ "out of phase" ได้ความสูงของคลื่นเป็นศูนย์ แสงจะมืด ดังรูปที่ 4.11

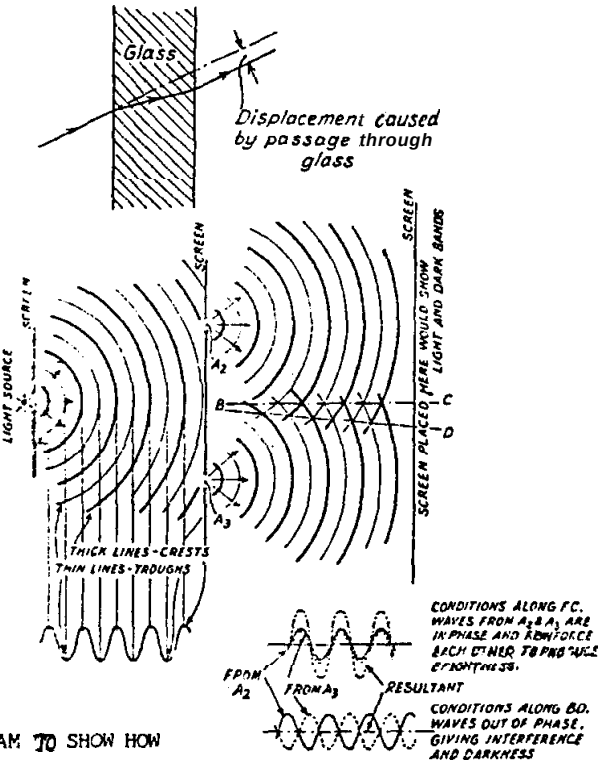
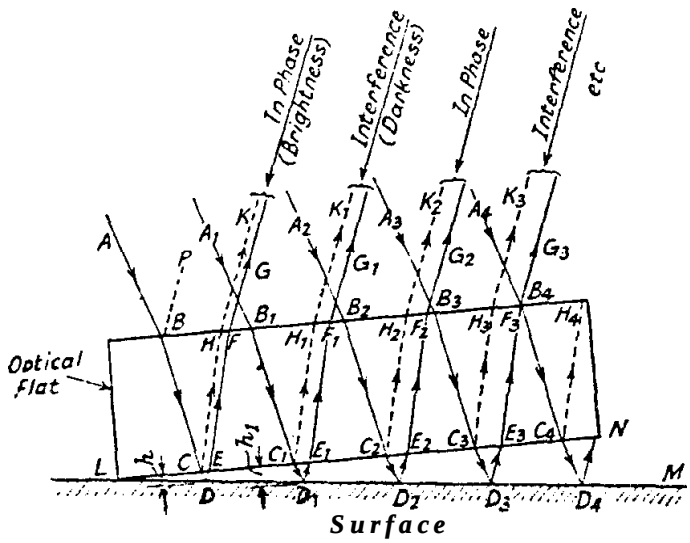


FIG DIAGRAM TO SHOW HOW INTERFERENCE MAY TAKE PLACE ALONG BD WAVE OUT TO PHASE GIVING INTERFERENCE AND DARKNESS

รูปที่ 4.11

การใช้แท่งแก้วเรียบใสเป็นตัววัดความเรียบหรือความยาวของงานนั้น จะใช้แก้วเรียบมีความหนาขนาด 1/2 นิ้ว ถึง 3/4 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 1/2 นิ้ว ถึง 3 นิ้ว และใช้งานในแสงประเภท Monochromatic light หรือแสงที่ได้จากหลอดโซเดียม (Sodium discharge lamp)



รูปที่ 4.12 CONDITIONS WHEN A SURFACE IS BEING EXAMINED WITH AN OPTICAL FLAT

ในรูปที่ 4.12 แสดงเส้นทางของแสง เส้น LN คือ พื้นผิวของแท่งแก้วเรียบ (optical flat) เส้น LM คือพื้นผิวที่ต้องการจะวัด MLN คือช่องว่างอากาศระหว่างแท่งแก้วเรียบกับผิวงาน

เมื่อลำแสง AB ตกกระทบบนพื้นผิวของแท่งแก้วเรียบ จะสะท้อนกลับเป็นลำแสง BP และส่วนลำแสงที่ทะลุผ่านแท่งแก้วเรียบ BC และจุด C ที่ตกระทบนั้นจะสะท้อนกลับขึ้นมาคือ CH หักเหออกไปในอากาศเป็น HK และมีลำแสงส่วนหนึ่งดิ่งผ่านทะลุลงไปกระทบบนพื้นผิวของงานที่จุด D จากงานจะสะท้อนกลับมาที่จุด E บนแท่งแก้วเรียบ สะท้อน

ตรงมายังด้านบนของแท่งแก้วเรียบที่จุด F และพุ่งตรงไปเป็นลำแสงขนานกับ HK เป็นเส้น FG ในทำนองเดียวกันปฏิกิริยาของแสง A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 และ A_4B_4 ก็จะมีปฏิกิริยาอย่างเดียวกับลำแสง AB เราไม่สนใจผลสะท้อนของลำแสง BP จะสังเกตผลที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวด้านล่างของแท่งแก้วเรียบ ในสภาพของลำแสงที่ผ่านจาก AB และ A_1B_1 ผ่านแก้วเรียบไปยัง C และ H เราพบว่าเส้นสะท้อนของแสง CHK และ $C_1H_1K_1$ มีลำแสงในลักษณะเดียวกัน จะมีจุดที่ช่วงลำแสงทับกันเป็นลักษณะ "in phase" ในผลตกกระทบและสะท้อนกลับของลำแสง CDEF และ $C_1D_1E_1F_1$ ล้วนแต่ทะลุผ่านแก้วแล้วตกกระทบบนพื้นผิวงานที่จุด D และ D_1 ลำแสงจะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะทางตกกระทบ เพราะ CD จะน้อยกว่า C_1D_1 ถ้าจะรวม CD + DE จะให้ระยะทางที่สังเกตได้จากลำแสงที่ลงไปตกกระทบในจุดต่างๆ ของแท่งแก้วเรียบแล้วสะท้อนกลับ CH และพื้นที่ $(C_1D_1 + D_1E_1) - (CD + DE) = (1/2)$ ของความยาวคลื่นแสง เมื่อลำแสง E_1F_1 ของลำแสงเส้นที่สองจะได้ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กันกับ C_1H_1 จะทำให้เกิดผลตรงข้ามกับผลที่แสงตกกระทบและสะท้อนกลับ และสังเกตได้ด้วยการมองเห็นด้วยตาจะเกิดเป็นช่วงสว่างในแนวลำแสงของ HK และ FG ช่วงมืดในแนวลำแสง H_1K_1 และ F_1G_1

จากการตกกระทบของแสง CD และ DE ซึ่งได้ฉากกับพื้นผิวของงาน ช่องว่างระหว่างแท่งแก้วเรียบกับงาน จากจุดตกกระทบเท่ากับระยะทาง h ผลต่างระหว่างจุดตกกระทบทั้งสอง $= 2h_1 - 2h = 1/2$ ของความยาวคลื่นแสง

ดังนั้นผลจะข้ามไปจาก in phase เป็น out of phase อยู่ในลักษณะที่มองด้วยตาจะเป็นแถบสว่างกับแถบมืด

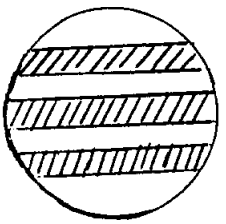
ถ้าความยาวของคลื่นแสง $= \lambda$

$\therefore \quad 2(h_1 - h) = (1/2)\lambda$

หรือ $\quad h_1 - h = (1/4)\lambda \qquad \ldots\ldots\ldots (1)$

จากสมการนี้หมายถึง ความแตกต่างของช่องว่างอากาศ (air gap) ระหว่างจุดศูนย์กลางของแถบแสง (band) แต่ละแถบจะเท่ากับ $(1/4)\lambda$ ตามลำดับ

(ทั้งแถบมืดและแถบสว่าง) ถ้าแถบสว่างต่อสว่าง หรือ แถบมืดต่อแถบมืด จะมีค่าเท่ากับ (1/2)λ

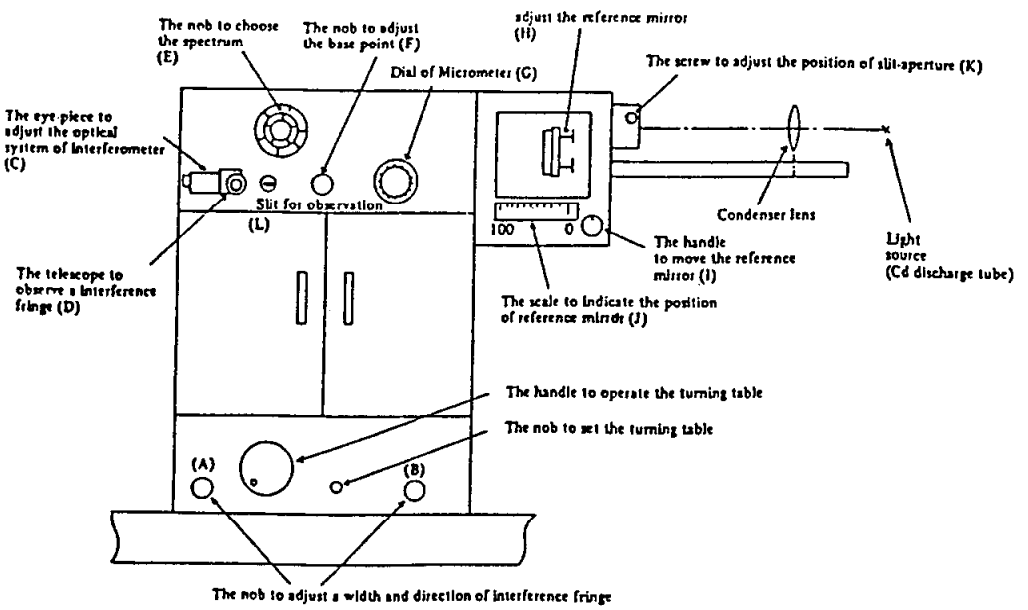


แถบแสง (bands)

รูปที่ 4.13 แถบแสง

ถ้านับจำนวนแถบแสงของสีเดียวกันเป็น N bands ความแตกต่างในความหนาของช่องอากาศ (air film) ต่อ 1 แถบแสง = (1/2) ดังนั้นความแตกต่างในความหนาของช่องอากาศต่อ N แถบแสง จะได้เป็น (1/2)N

การวัดความยาวโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Gauge block Interferometer ซึ่งเป็น light wave interferometer ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นรูปเครื่องมือวัดความยาวของแท่งเทียบโดยใช้คลื่นแสง โดยใช้หลอดไอโซโทปแคดเมียม (Cadmium Isotope Lamp)



รูปที่ 4.14 The Outside of interferometer

Optical interferometer เป็นเครื่องมือที่ดีเลิศในการวัดความยาวได้แม่นยำในเทอมของความยาวคลื่นแสง

เมื่อลำแสง 2 ลำ (two beams) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำที่จุดๆ หนึ่งในอวกาศ (space) คลื่นที่ได้ (resultant wave) ที่จุดนั้นจะมีความเข้มและเฟสซึ่งหาได้โดยการรวมเวกเตอร์ของแอมปลิจูดและเฟสขององค์ประกอบในการทำปฏิกิริยาต่อกัน ปรากฏการณ์นี้ คือ interference

แอมปลิจูดของแสงในขณะใดขณะหนึ่ง จะได้จากทฤษฎีของทรรศนศาสตร์ทางคลื่น (theory of wave optics) ดังสมการต่อไปนี้

$$A(t) = A_o \sin(2\pi Ct/\lambda + \phi) \qquad \ldots\ldots\ldots (2)$$

เมื่อ A = แอมปลิจูดของแสง

C = ความเร็วของแสง

λ = ความยาวคลื่นของแสงเอกรงค์ (monochromatic light)

t = เวลา

ϕ = เฟส

ความเข้มของลำที่กระทำต่อกัน (interference beam) หาได้โดยใช้สมการ (2) และหลักการของ light wave interferometer ซึ่งดูได้จากรูปที่ 4.14 จะได้สมการดังนี้

$$I = 2I_o \cos^2(\pi \Delta l/\lambda)$$

$$= 2I_o \cos^2(2\pi x/\lambda) \qquad \ldots\ldots\ldots (3)$$

เมื่อ I_o = ความเข้มของลำแสงตกกระทบ (intensity of incident beam)

$\Delta l = l_2 - l_1$ = optical path difference

X = difference of arm of interferometer

λ = ความยาวคลื่นของแสงเอกรงค์

$\Delta l = 2X$

จากสมการ (3) $I = I_{min}$

เมื่อ $$X = (N + 1/2)(\lambda/2) \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

(N = 0, 1, 2, 3, . ..)

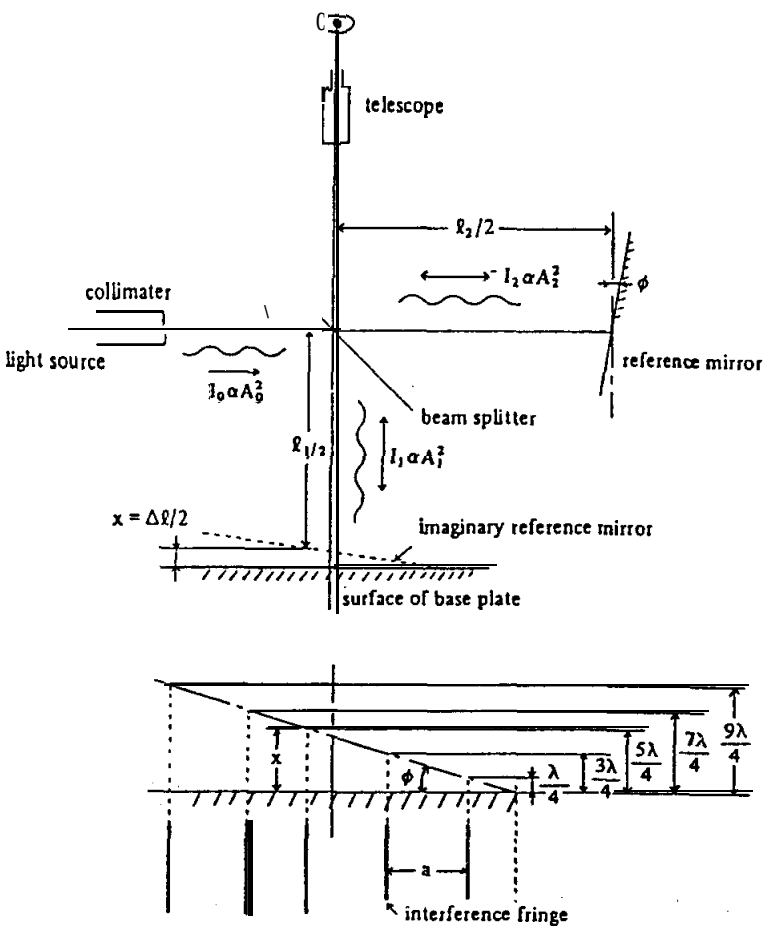
$$\Delta X = \lambda/2$$

$$a = \Delta X/\tan\phi$$

$$= \lambda/(2\tan\phi) \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

ΔX = ผลต่างของความยาวของแขนในหนึ่งฟริ้งจ์ (fringe)

a = ระยะของหนึ่งฟริ้งจ์



รูปที่ 4.15 Michelson Interferometer for length measurement

จากสมการ (4) และ (5) และจากรูปที่ 4 . 1 6 จะได้ว่า

$$\overline{G_1G_2} = (\lambda/2)(N_1 \text{ t } 1/2)$$

$$\overline{P_IP_2} = (\lambda/2)(N_2 \text{ t } 1/2)$$

จากสมการ (5) และรูปที่ 4.16

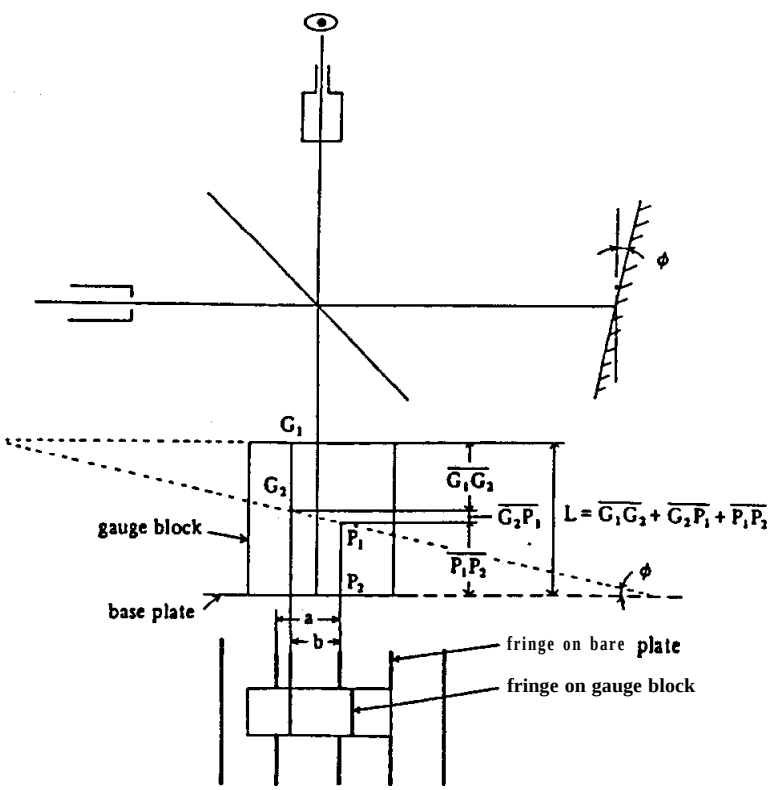
$$\overline{G_2P_1} = b \tan\phi$$

$$= (\lambda/2)\ (b/a)$$

$$= (\lambda/2).\epsilon$$

เมื่อ ϵ = b/a = fractional number (phase)

L = gauge length



รูป 4.16 Principle of calibration of gauge blocks

$$\therefore \quad L = \overline{G_1G_2} + \overline{G_2P_1} \text{ t } \overline{P_1P_2}$$

$$= (\lambda/2)(N_1 \text{ t } 1/2) \text{ t } (\lambda/2)\epsilon \text{ t } (\lambda/2)(N_2 \text{ t } 1/2)$$

$$= (\lambda/2)(N_1 \text{ t } N_2 \text{ t } 1 + \epsilon)$$

$$= (\lambda/2)(N + \epsilon)$$

$$L_o = (\lambda/2)(N_o \text{ t } \epsilon_o) \qquad \ldots\ldots (6)$$

L_o = nominal length of gauge

N_o = nominal integer number

ϵ_o = nominal fractional number

ดังนั้น การเบียงเบนจากค่าทีระบุ ตัวกำหนด คือ

$$AL = L - L_o$$

$$= (\lambda/2)[(N - N_o) \text{ t } (\epsilon - \epsilon_o)]$$

$$= (\lambda/2)(\Delta N + \Delta\epsilon) \qquad \ldots\ldots (7)$$

ซึ่ง λ = ความยาวคลื่นของแสงที่ทราบค่า

AN = integer number

$\Delta\epsilon$ = fractional number = $\epsilon - \epsilon_o$

ΔL = การเบี่ยงเบนจากค่าที่ระบุ

ϵ_o หาได้จากสมการ (6) โดยการคำนวณ และ ϵ หาได้จากการสังเกต AN หาจากmethod of excess fractions ซึ่งϵของสี่สีได้จากการสังเกตสเปกตรัมทั้งสี่สี จะได้สมการดังนี้

$$\Delta L = (\lambda_R/2)(\Delta N_R + \Delta\epsilon_R)$$

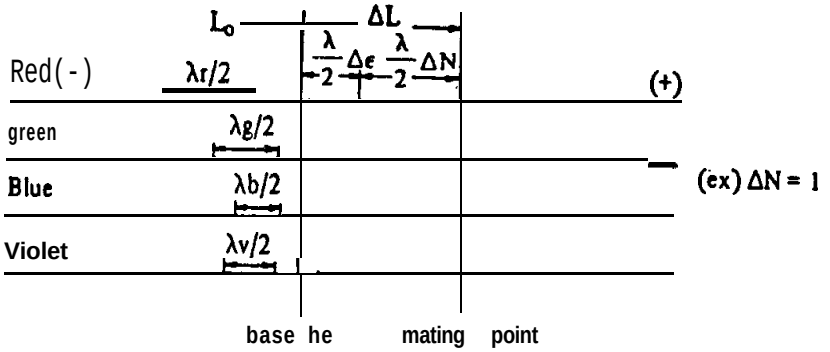
$$= (\lambda_G/2)(\Delta N_G + \Delta\epsilon_G)$$

$$= (\lambda_B/2)(\Delta N_B + \Delta\epsilon_B)$$

$$= (\lambda_V/2)(\Delta N_V + \Delta\epsilon_V)$$

คำนวณหาค่าเฉลี่ยของ fractional number (ϵ_f) ของแต่ละสเปกตรัม ($\epsilon_f = b_1/a_1$) และ $\Delta\epsilon_f$ และลากตำแหน่งของ $\Delta\epsilon_f$ และครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

ของแต่ละสเปกตรัม ดังแสดงในภาพของรูปที่ 4.17 จะแสดงตำแหน่ง ΔL เราสามารถหา integer number (ΔN) จากตำแหน่งของสเปกตรัมสีแดง



รูปที่ 4.17 Determination and calculation of length of gauge block

สมการที่ได้กล่าวมาทั้งหมดใช้ภายใต้ภาวะอ้างอิงทางอุตสาหกรรม นั่นคือ

อุณหภูมิ : 20 °C (293.1 K)

ความดันบรรยากาศ : 760 mm Hg (101.325 kPa)

ความชื้น (ความดันไอของน้ำ) : 10 mm Hg

อัตราส่วนของก๊าซ CO_2 ในอากาศ : 0.03%

วิธีการวัดความยาวโดยใช้คลื่นแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 หลังจากเตรียมแท่งเทียบโดยประกบกับแท่งแก้วเรียบ (optical flat) แล้ว วิธีการประกบจะกล่าวในเรื่องการวัดความยาวต่อไป ให้แท่งเทียบมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ แล้วจึงนำเข้าไปใส่ใน interferometer ซึ่งมีหลอดแคดเมียมเป็นตัวกำเนิดแสง วัด fractional number (phase) ของ interference fringe โดย

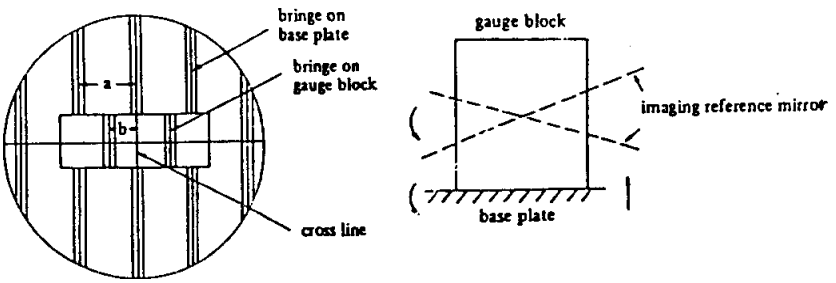
1. ภาพของสเปกตรัมสีแดงจะทับเป็นเส้นเดียวกับตำแหน่งกลาง (central position) ของ slit (L) โดยหมุนปุ่ม (E) จากรูปที่ 14.4

2. ภายหลังจากปรับ dial (G) ให้อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ แล้วให้เส้นตั้ง

(vertical line) ของเส้นตัดขวาง (cross line) ทับกับ interference fringe ของ base plate โดยใช้ปุ่ม F และให้เส้นตั้งทับกับ interference fringe ของแท่งเทียบโดยปรับ dial (G) อ่านค่า (ตัวชี้บอก) ของ dial (G) ให้ละเอียดถึง 1 ช่อง (division) เราจะได้ค่า b ต่อไปจัดให้เส้นตรง (ตั้ง) ทับกับ interference fringe อื่นๆ ของ base plate โดยใช้ dial (G) และอ่านค่า a จาก dial (G) ดังนั้นเราหาfractional number (phase) ได้จาก

$$\epsilon = b/a$$

(a และ b ดูได้จากรูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.18

3. ภาพของสเปกตรัมสีเขียวให้ทับกับตำแหน่งกลางของ slit (L) โดยหมุนปรับปุ่ม (E) แล้วดำเนินการตามข้อ 1 และ 2 ก็จะได้ค่า a และ b จากสเปกตรัมสีเขียว เช่นเดียวกับสเปกตรัมสีแดง

4. ต่อไปก็ใช้สเปกตรัมสีน้ำเงินและสีม่วง ตามลำดับ

5. เราเปลี่ยน slope ของแท่งเทียบด้วยปุ่ม (B) จะเห็นภาพดังรูปที่ 4.18 (ขวามือ) และดำเนินตามข้อ 2 อ่านค่า a และ b เช่นเดียวกัน

4.3 การวัดความยาว

การวัดความยาวจะใช้เครื่องมือวัดแบบต่างๆ เครื่องมืออาจจะเป็นเครื่องมือวัดแบบมีค่าที่อ่านสเกลได้ในตัวมันเอง (direct measurement หรือ graduated scale) และเครื่องมือวัดประเภทที่อ่านค่าโดยการเปรียบเทียบ (comparison measurement)

ชนิดและการใช้เครื่องมือวัดความยาว มีดังต่อไปนี้

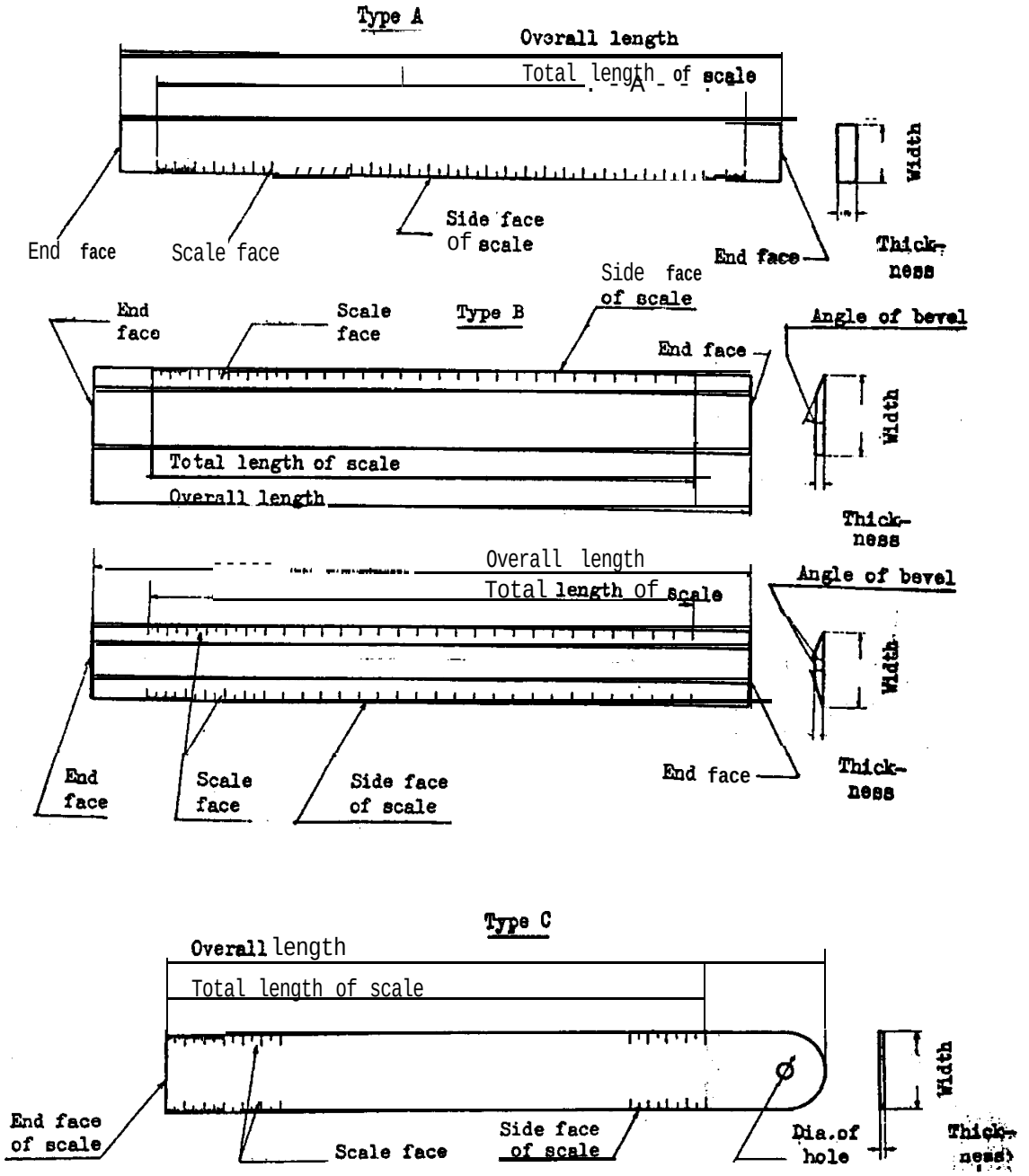
1. **บรรทัดเหล็ก** (Steel Ruler) บรรทัดเหล็กเป็นเครื่องมือวัดขั้นพื้นฐาน ช่างเครื่องมือกลต้องรู้จักเป็นอย่างดี ส่วนใหญ่จะทำด้วยเหล็กไร้สนิม (stainless steel) หรือเป็นเหล็กชุบอาบผิวด้านไว้เพื่อป้องกันสนิม และป้องกันไม่ให้แสงสะท้อนเข้าตาผู้ที่ทำการวัด ตามมาตรฐาน JIS B7516 ได้แบ่งบรรทัดเหล็กออกเป็น 3 ชนิด คือ ดูรูปที่ 4.19

1.1 Type A ใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องสูง

1.2 Type B ซึ่งปลายของขอบจะตัดเป็นมุม อาจจะด้านเดียว หรือทั้งสองด้าน แบบนี้เหมาะในงานวาดแบบ (drawing work)

1.3 Type C ใช้ได้ทั่วๆ ไป

บรรทัดเหล็กมีทั้งแบบสเกลหน้าเดียวและสเกลสองหน้า บอกขนาดเป็นสเกลนิ้วล้วน หรือสเกลมิลลิเมตรล้วน หรือแบบที่มีทั้งสองสเกลในอันเดียวกัน มีทั้งชนิดแข็งทรงตัวได้ดี และแบบบางมาก งอตัวได้ตามรูปงานที่ต้องการ


Type A
Overall length
Total length of scale
End face
Scale face
Side face of scale
End face
Width
Thick-ness
Type B
End face
Scale face
Side face of scale
End face
Angle of bevel
Width
Total length of scale
Overall length
Thick-ness
Overall length
Total length of scale
Angle of bevel
Width
End face
Scale face
Side face of scale
End face
Thick-ness
Type C
Overall length
Total length of scale
End face of scale
Scale face
Side face of scale
Dia.of hole
Width
Thick-ness

รูปที่ 4.19

ข้อควรระวังในการใช้บรรทัด บรรทัดเหล็กเป็นเครื่องมือวัดที่ให้ค่าความละเอียดพอสมควร การใช้จำเป็นต้องมีความระมัดระวังเหมือนกับเครื่องมือวัดอื่นๆ ที่มีความละเอียดเช่นกัน คุณภาพของงานจะขึ้นอยู่กับการใช้เครื่องมือวัดที่มีความระมัดระวังอย่างถูกต้อง และเหมาะสมกับงานด้วย

ก. จะต้องเลือกบรรทัดที่ใช้งานให้ถูกต้องและเหมาะสมกับสภาพของงาน

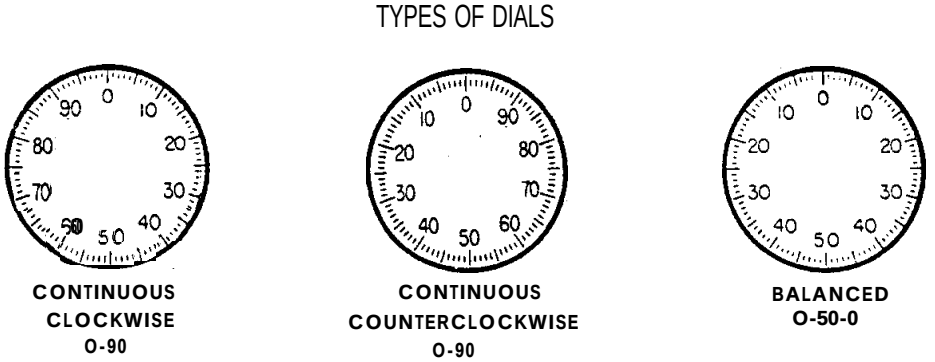
ข. บรรทัดเหล็กมีไว้สำหรับวัดขนาดของงานเท่านั้น ไม่เหมาะสำหรับใช้แทนเครื่องมืออื่นๆ เช่น ใช้บรรทัดแทนไขควง เป็นต้น

ค. ขณะทำงานบนเครื่องจักรจะต้องวางบรรทัดให้พ้นจากแนวทิศทางการขับเคลื่อนของเครื่องจักร อาจทำให้บรรทัดและเครื่องจักรเสียหายได้

ง. การทำความสะอาดบรรทัดโดยเช็ดให้สะอาดก่อนจะวัดขนาดของงานจะทำให้ขีดแบ่งสเกลอ่านค่าได้ชัดเจน ถูกต้องแน่นอน

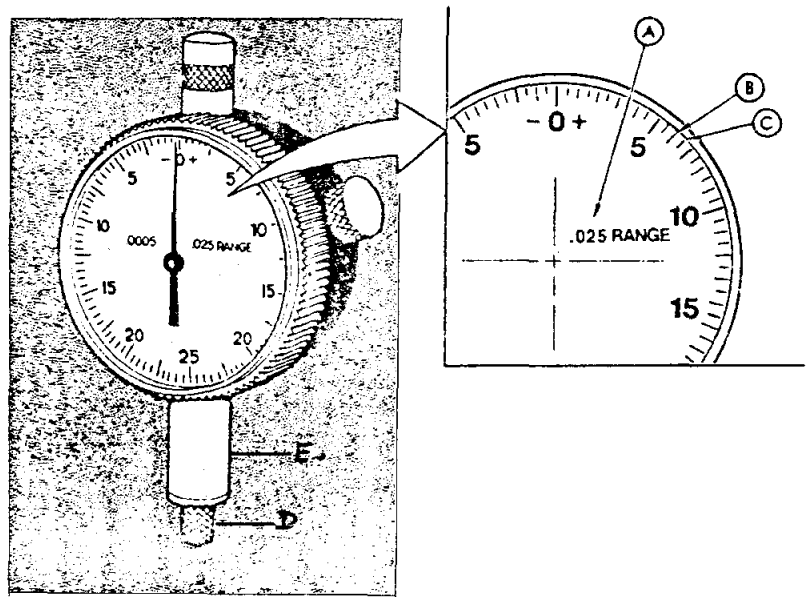
จ. ควรใช้บรรทัดอย่างระมัดระวัง อย่าให้ขอบของบรรทัดมีรอยบุบช้ำ จะทำให้การวัดขนาดผิดพลาดได้

2. **นาฬิกาเทียบศูนย์** (Dial Indicator) เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบขยายในส่วนละเอียดโดยใช้หลักทางเครื่องกล มีให้ใช้อยู่ 3 แบบ แบบเข็มชี้เดินตามเข็มนาฬิกา แบบเข็มชี้เดินทวนเข็มนาฬิกา และแบบเข็มชี้สมดุลทั้งสองด้าน ดูรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 These are the three types of dials used on dial indicators, and the method for designating

ส่วนประกอบต่างๆ ของนาฬิกาเทียบศูนย์ ดูรูปที่ 4.21



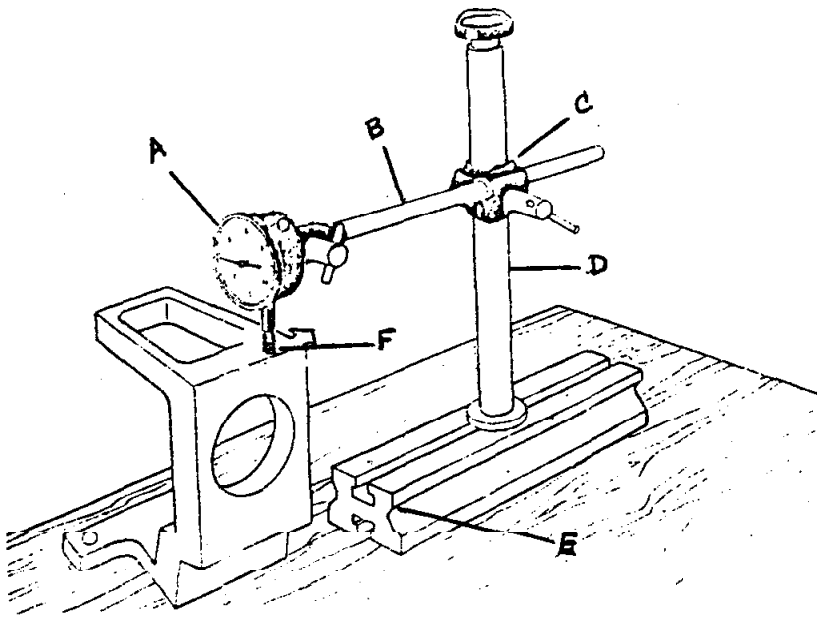
รูปที่ 4.21

ช่วงของการวัด (A) บนหน้าปัทม์บอกไว้ 0.025 นิ้ว ในแต่ละช่องของตัวเลข (5, 10, 15, ... เป็นต้น) คือ ช่องบอกขนาด 0.005 นิ้ว, 0.010 นิ้ว ตามลำดับ ระหว่างช่องตัวเลขจะมีขีดย่อยบอกขนาดทั้งขีดสั้นและขีดยาว ขีดยาว (B) ให้ขนาด 0.001 นิ้ว ขีดสั้น (C) ให้ขนาด 0.0005 นิ้ว แกนวัด (D) เป็นส่วนหนึ่งของนาฬิกาเทียบศูนย์ ใช้สำหรับสัมผัสแตะวัดบนพื้นผิวของงานที่จะวัด โดยใช้ประกอบกับอุปกรณ์ในการวัด กลไกของแกนวัดจะเคลื่อนเข้าหรือออกเปลี่ยนไปตามสภาพของงานที่จะวัด การเคลื่อนที่เข้าออกโดยอยู่ในแนวแกนของหน้าปัทม์ตลอดเวลา โดยมีปลอกแกนวัด (E) บังคับอยู่ การเคลื่อนที่เข้าออกจะส่งกำลังไปขับเคลื่อนให้เข็มบนหน้าปัทม์เคลื่อนไปทางซ้ายหรือทางขวา

ในการวัดตรวจสอบขนาดต่างๆ ด้วยนาฬิกาเทียบศูนย์ (A) จะต้องทำให้

นาฬิกาเทียบศูนย์อยู่ในตำแหน่งที่มั่นคง โดยการจับยึดประกอบกับโครงในชุดวัดตรวจสอบ (Test sets) เพื่อจะทำให้การเคลื่อนที่ของแกนวัด (F) ไปบนพื้นผิวของงานได้ถูกต้องแน่นอน ไม่เกิดค่าผิดพลาดบนแกนวัด ชุดวัดตรวจสอบประกอบด้วยฐานเหล็ก (E) ดูรูปที่ 4.22 ซึ่งทำเป็นร่องรูปตัว T (T-slots) เมื่อใช้สวมเสาตั้ง (D) และปรับเลื่อนให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ได้ตามต้องการ และชุดประกับเลื่อน (C) ใช้ยึดก้าน (B) ที่ต่อมาจากท้ายของนาฬิกาเทียบศูนย์ และปรับเลื่อนขึ้นลง และเลื่อนนาฬิกาเทียบศูนย์ให้เข้าและออกได้ ในรูปเป็นการวัดพื้นผิวเปรียบเทียบบนงานในแผนกช่างของโรงงานว่ามีความแตกต่างของขนาดบนพื้นผิว หรืองานเอียงไปในทางใดทางหนึ่งหรือไม่ เพื่อจะได้นำค่าที่เปลี่ยนแปลงจากการวัดตรวจสอบนี้ไปปรับแก้ที่เครื่องจักรที่ใช้การสร้างงานที่วัดนี้อีกทีหนึ่ง

การใช้งานของนาฬิกาเทียบศูนย์จะเปลี่ยนไปตามสภาพของงานที่จะวัด โดยใช้อุปกรณ์ประกอบเพื่อให้การวัดได้ผลสมบูรณ์ นาฬิกาเทียบศูนย์จะใช้วัดตรวจสอบความแตกต่างของพื้นผิวงาน ขนาดของงานที่มีความเรียบไม่เท่ากันตลอด หรือใช้ตรวจสอบแนวศูนย์กลางของงานกลม



รูปที่ 4.22