

菸葉乾燥基本理論之研究與應用

Studies on Tobacco Curing and Drying Theory and Its Practices

臺灣大學農業工程系講師

馮 丁 樹

D. S. Fon

臺灣大學農業工程系副教授

陳 貽 倫

Y. L. Chen

一、前 言

本省菸葉栽培之歷史，可追溯自荷人據臺時期。劉銘傳主臺時，亦曾獎勵種植，並派員赴呂宋學習耕種方法。日人據臺後行專賣制度，對於菸草之耕作，品質及銷售均經過有效改良，漸成爲遠東菸草供應地之一。光復後，即由菸酒公賣局接管，並沿襲舊有專賣制度，舉凡有關於菸草種子之輸入、種植、菸葉之收購等均在管制之範圍，其中僅菸草之栽培，收穫與調製委由農民經營。菸農需將菸草乾燥調製後，方由公賣局按等級收購。菸草爲集約性作物，故所需勞力甚多。據估計，每公頃約需 704.4 工，而其中僅乾燥調製一項即佔一半以上。此項勞力若計及工作內容與辛勞程度，其所佔之比例將更高。無可諱言，菸葉乾燥應爲菸葉栽培過程中最重大之一段作業，乾燥好壞，對於菸葉品質與產量均有極深的影響。而乾燥期間之各項操作，亦極需熟練之技術與經驗，故即使本田種植及管理均儘得宜，但若乾燥工作稍有疏忽與貽誤，整季之工作均將徒勞無功。

本省之烤菸設備亦一向沿用日據時代之型式。其他方面諸如育種、耕作技術等，歷經廿餘年，雖不斷改進，但烤菸方面一直未有革命性的改變。故無論就勞力、時間、以及熱源之利用等觀點言，殊不經濟。在以往農村形態未稍有改變以前，此項工作常委由童工、女工，是一種家族經營型式。近年來，雖有採取合作換工方式，以應付其所需之龐大人力，然由於農村人口之普遍性移向城市，僱工顯已不可能，而換工亦有無以爲繼的現象。近年來世界各地農業機械急速發展，菸草之生產事業亦不例外，故如何促進菸草栽培作業之現代化、機械化，以達省時省工之目的，實爲當前最迫切之課題。

二、有關於菸葉烤製之基本認識

(一)、菸葉採收之現況

菸草原產熱帶，生長期需溫暖氣候，但非爲絕對因子，一般言之，凡無霜期 120 日以上地區均可栽培，氣溫則以 $24^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{C}$ 最爲適宜，但仍需配合當地之雨量、溫度、日照與土壤特性。方能獲得品質優良之菸葉。

本省因土壤與氣候之關係，均爲秋菸。普通約在每年八~九月播種，十至十一月移植，十二月至翌年二月採收。因此烤菸工作亦在此期間內，其中以一月份爲最多。收穫期間，菸葉自下部葉片開始成熟，故無法一次採收。又因烤菸室容量之限制，採收菸葉數量需與之配合。其收穫次數約爲土葉一次，中葉 2~2 次，本葉 2~3 次，天葉 1 次。一般爲配合烤菸室之利用，大約每週採收一次，每株一次採收 2~3 片。採收至 1/3 以上時，部份菸農採用分塊整田一次採收。本省菸葉主要分佈在臺中、嘉義、屏東與花蓮等地，栽培面積約達一萬多公頃，年產量二千一百多萬公斤，其中以屏東地區最多，種植面積佔 40% 以上。

(二)、菸葉之特性

本省種植之菸草經菸試所廿年來不斷改良，品種甚多，但仍以黃色種爲大宗。其栽培情形如圖(一)所



圖一、菸葉之成長情形

示，此種菸葉與其他品種最大不同是調製期間，必須

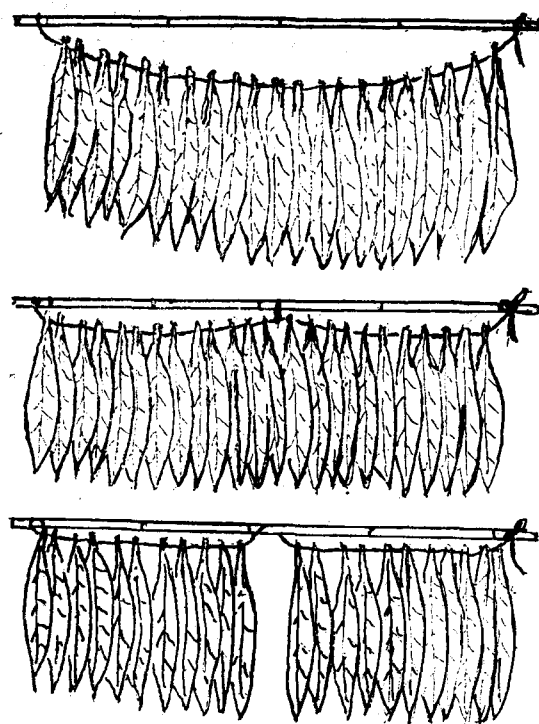
經過管烤，其色澤以金黃色為最佳。

黃色種菸葉平均葉長約 70cm，最長約 80cm，每葉重約 0.07 公斤，生長期間，每株約產菸葉 14~15 片，其成熟期自下而上，故一般自下而上將各葉分為土、中、本、天葉四類。一株菸葉之成熟度上下差異很大，易導致烘烤困難。土、中葉因屈居下部，日照不足，易枯黃，復多病，烤製時常生褐變。而本、天葉，發育期間，因氣溫下降，常遭逢寒流與暴雨侵襲，導致葉肉增厚，綠色過深，黃變不易；因此，黃變時常拖長達 80 小時以上。

(三)、菸葉之處理

採收之菸葉在進入烤菸室之前應速依據葉之位置，形狀、大小及熟度分別選別，通常葉大而色澤稍綠者為未熟葉，黃綠色者為適時葉，已黃者為過熟葉，分類完畢後將之穿聯掛架，以便乾燥，現行菸葉成聯方法有穿聯法與綁菸法兩種，目前本省大部分菸農均採用後者之綁架方式。

穿聯法如圖(二)所示，利用長約 1.3 公尺左右之竹竿，一端縛於線，穿過刺葉針，刺於葉於中骨正面及另一葉之反面，將兩葉合成一對，每聯葉數及重量如表(一)所示。綁菸法係經菸試所改良而得，又稱臺菸式



圖二、穿聯法

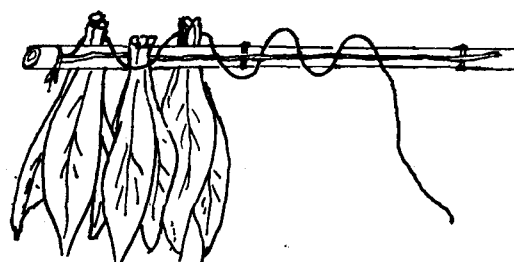
表一、穿聯法與臺菸式烤菸法吊掛聯數比較

	穿 聯 法						綁 菸 法					
	每 聯		吊 掛 聯 數				每 聯			吊 掛 聯 數		
	總葉數 (片)	重 量 (kg)	烤 菸 室 別	聯 數	總葉數 (千片)	每 把 葉 數	總葉數 (片)	重 量 (kg)	烤 菸 室 別	聯 數	總葉數 (千片)	
上 葉	32~40	1.3~1.6	4坪 6坪	600 900	19-24 29-36	3	90~100	3.5~4.0	4坪 6坪	400 600	36-40 54-60	
中 本 葉	28~36	1.4~1.8	4坪 6坪	600 900	17-22 25-32	2	70~80	3.8~4.2	4坪 6坪	400 600	28-30 42-45	
天 葉	36~44	1.8~2.2	4坪 6坪	600 900	22-26 32-40	3	100~110	3.5~4.0	4坪 6坪	400 600	40-44 60-66	

綁法。其法如圖(三)所示，利用穿聯法之竹竿附加兩條綁菸線，於臺菸式綁聯架上操作，其有關葉片數如表(一)之比較。

三、乾燥期菸葉之變化

一般菸葉之烘烤方式視其品種而異，可分為日晒、氣乾 (air curing)、蔭乾與管烤等方法。黃色種菸葉則必須經過管烤方可獲得優良之品質。此項品質除須具有金黃色澤外，其內容成份亦須經過適當之

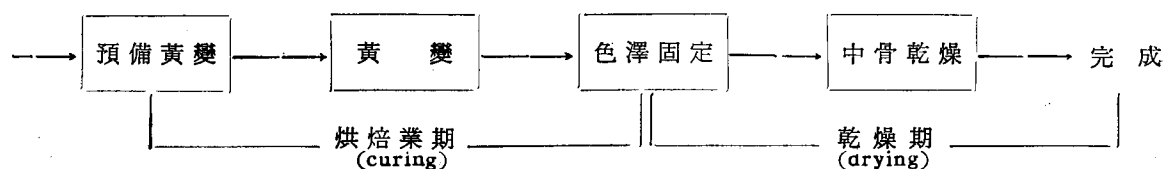


圖三、臺菸式綁菸法

變化。因此，菸葉乾燥之目的，不僅要脫除鮮葉中之水分，並且須能促進葉內成分之化學變化，使其乾燥後，具有特殊之色香味。

菸葉自採收後，其變化，約可分為兩階段，前期菸葉由綠轉黃，葉內澱粉糖化，稱烘焙期 (curing)。後期為中骨部分之乾燥，故稱中骨乾燥期。純粹為固態乾燥之現象。新鮮菸葉若未經烘焙期而直接乾燥，則綠色留存，抽吸時味道強烈，且有惡臭。經過烘焙過程後，鮮葉呈黃金色，完全乾燥，抽吸時味道緩和而有香味。

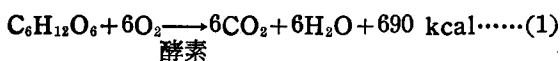
(一) 烘焙過程之變化



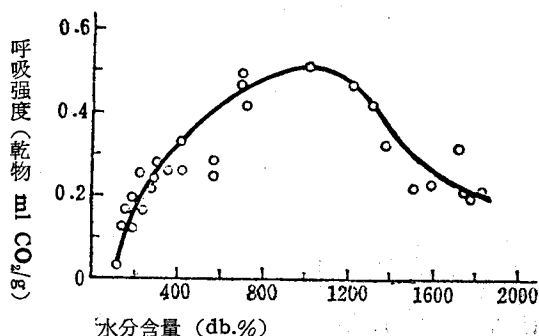
在烘焙期間，由於呼吸作用、葉片之水分、色澤、化學成分與溫度均有明顯之變化，茲分別敘述如下：

1. 葉之呼吸作用：

經過各種呼吸酵素羣之作用，葉中之糖等養分即行分解，消耗部份乾質，並產生二氧化碳、水與呼吸熱，其方程式如下：



此 690 kcal 之熱量供給細胞生命維持之所需。提供呼吸作用之糖類稱為呼吸基質，呼吸基質愈多，其呼吸作用愈盛。惟呼吸作用仍受內部水分含量與外界溫度所限制。據試驗：呼吸作用在某水分範圍內作用最強，如圖四。水分漸減時，葉片成分變化，呼吸

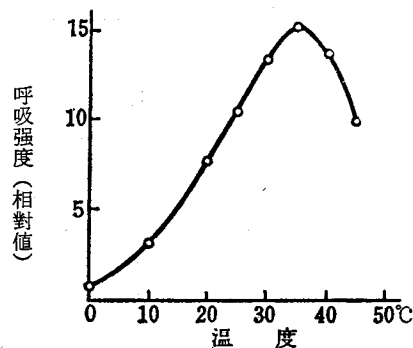


圖四、水分含量與呼吸作用之關係

基質供應量增加，故呼吸作用增強；但水分更降低

生葉採收後，其細胞之養分補給中斷，為維持其生命力不得進行呼吸作用，消耗其本身貯存之乾質產生熱量，在細胞生存期間葉內之各種酵素亦羣起活動，尤以氧化酵素與弗羅門色素活動更烈，葉綠素開始分解逐漸明顯而呈黃金色，此稱黃變期 (yellowing)，黃變過後，各種酵素活動仍然十分活潑，若不予以抑制，葉色將由黃轉褐，損及黃色種菸葉之品質。因此必須逐漸減低水份，使細胞活力減弱，上述葉色之轉變亦告遲緩，此稱為色澤固定。黃變與色澤固定合成為烘焙期，烘焙期過後，方為正常之乾燥工作，其程序如下所示：

時，因細胞內原形質產生變化，呼吸強度遂告減弱。溫度方面之影響如圖五所示。溫度愈高，呼吸作用愈



圖五、溫度與呼吸作用之關係

強，但超過某限度後隨即轉弱。此時呼吸作用最適宜之溫度乃因植物種類而異。一般言，約在 30~45°C 之間，最高界限溫度為 50°C。過此溫度細胞即行死亡。菸葉方面，最適溫度為 36~37°C，45°C 以上，呼吸作用停止。

由於呼吸期間產生二氧化碳，故室內二氧化碳之濃度亦將影響呼吸作用之進行。此在直火乾燥方面，似應加以考慮。

2. 呼吸過程之其他現象：

呼吸作用之同時產生呼吸熱，因此密閉堆積後，溫度隨即上升。一般菸葉堆放 10 小時後 (室內溫 27~30°C)，葉溫可達 42~46°C，約高外界溫

10°C。有些菸農因此常利用此呼吸熱以行黃變。唯此種黃變效果較差、時間較長，且不易控制。雖然如此，呼吸熱之故，黃變期所耗之燃料將較少。

呼吸作用另一附帶現象為乾物之損失，因為部份醣類已產生酸化分解。一般言之，烘焙期間，乾物質損失最多，以後則次第減少。以百葉黃 (Bright-yellow) 為例，黃變期乾物約減12%，總過程中減少率為18%。此損失率亦依菸葉品種、位置與成熟度而不同。據試驗，未熟葉約 25.5%，適熟葉 14.7%，過熟葉 10.9% (Burley種)。此項乾物損失量雖少，嚴格言之，在計算脫水量時亦應加以考慮。設以生葉 100 克予以急乾，得乾物重 15 克，則脫水量為 85 克，上項因為急乾，乾物損失少，若採用一般法乾燥，其乾物損失平均為20%，則乾物失重為 $15 \times 20\% = 3$ 克，此重佔總脫水量 $3/85 = 0.035$ 。故實際計算總脫水量時，應扣除 3.5% 之乾物損失。

3. 水分之變化

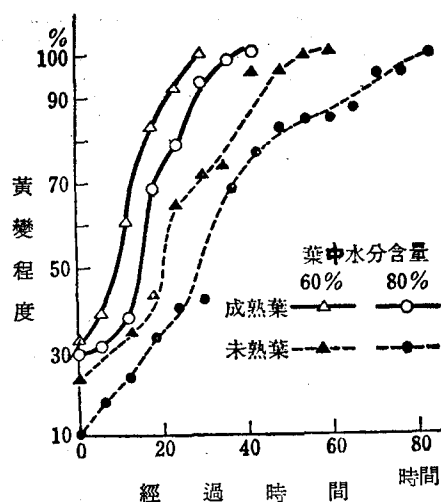
普通之成熟菸葉，其含水量約為85% (濕基)。在乾燥過程中之前期，大部份需要蒸發排除。設一乾燥室吊掛生葉 2,000 公斤，則其總含水量有一千七百公斤，而其中97%之水必須去除。一般黃色種菸葉乾燥時間約需 100 至 120 小時，欲使其黃色變化與成分變化均無妨礙，必須於烘焙期間將百分之八十以上水分排棄，不然阻害殊多。此項水分之排除均用人工方法調節，舊有方式極為繁瑣而且勞累，新式烤菸葉機械所使用之自動控制排氣，或降低建築高度，均足以減輕此項工作負擔。

黃色種菸葉乾燥後，經過吸濕、解聯，其最終含水率分別為：土葉13%，中葉14%，本葉16%，天葉17%，平均含水量約為15%，若超出此含水量，於貯藏期間，可能導致霉爛。

4. 葉色之變化

收穫後之菸葉，葉色為淡綠或綠色，其葉中之葉綠粒含有葉素與黃色素。在乾燥期間，乾球溫度在35至48°C，濕球在30~35°C內，葉綠素因氧化酵素及過氧化酵素的作用，乃逐漸分解，而黃色素中如 Carotene 與 Xanthophyll，原為葉綠素所隱蓋，此時立即活動而顯現出來，綠色逐漸減退而呈現黃色，此即為一般所謂之黃變 (yellowing)。一般黃變之條件與菸葉本身之熟度、位置、水分、氣溫、濕度有直接之關係，茲分述如下：

(1) 葉之熟度：適熟之菸葉其黃變期遠較未熟葉為短，由圖(六)上比較可知，在同樣含水率狀況下，未熟

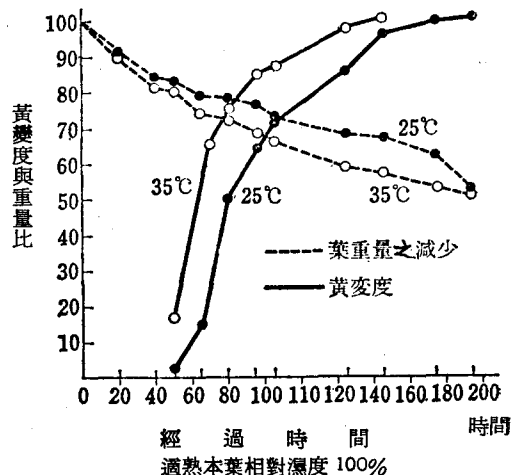


圖六、成熟度與水分與黃變之關係

葉黃變所需之時間約以倍數增加，此種狀況增加烤菸作業上不少困難。

(3) 水分含量：黃變之進行過程中，水分之控制是一重要之因素，在此期間，若急劇進行脫水，則細胞迅速死亡，綠色殘留而產生青乾；脫水過慢，反而使黃變期拖長，一般言，葉中水分多時，其黃變較緩，水分超過90%以上時，黃變根本無法進行。圖(六)中所示為水分80%與60%時，黃變時間比較，適熟葉約差16小時，未熟葉則差20小時以上。

水分過低，黃變亦呈現困難，其界限約為45~50%左右。在此以下，無法黃變，因此，理想之黃變含水率約在60%左右。黃變後，必須配合乾燥作業，否則水分過多，酵素之作用仍然繼續運行，使金黃色轉變為褐色。故葉色變化需要與排濕相互配合，有一分黃變應伴隨一分排濕，其水分之變化如圖(七)所示。



圖七、溫度對黃變之影響

(3)溫度之影響：黃變時之溫度依葉位不同而有差異，一般言，本葉以上，葉肉較厚，前半期採 38°C 後半期為 39~40°C；中葉以下則採以下 35~40°C 30°C 時黃變較長，20°C 時約比 30°C 時增加 4 成之時間，(參閱圖七)，42°C 以上黃變遲緩，葉色亦不鮮明。47°C 以上已無法進行黃變。因為此時細胞之活力已弱，至 50°C 時細胞死亡。

5.化學成分之變化

菸葉之化學變化大體上與酵素有關。酵素為細胞原形質，自然生成一種膠質性有機化合物。其種類繁多，可促進菸葉內各種成分之變化。其主要者有：

(1)醣類的變化：鮮葉之成分除水分外，含量最多者為碳水化合物。其含量未熟葉佔 31.4%，適熟葉 42.6%，過熟葉 38.4%。此項碳水化合物以澱粉為主，部份為單糖類。在乾燥過程中，澱粉含量減少，大都經由加水分解酵素轉變為單醣或雙醣。其過程如下所示：



由於菸葉之品質係依簡單醣類含量之多寡決定。含量愈高者愈佳。故黃色種菸葉在糖分含量最多時，即宜迅速乾燥，以固定其糖分。否則糖分必因烤製時間之拖長而氧化。

(2)氮素化合物之變化：氮素化合物在烤製過程中，其含量之變化不如糖類之甚。其中蛋白質應順序演變為可溶性之氮化物。蛋白質若多量殘留，易導致葉質粗糙，缺乏油性。

(3)其他諸如尼古丁，有機酸、樹脂、無機物等之變化則較少。

6.褐變成因之探討：

在細胞仍具活力期間，褐變現象較少發生。但細胞死亡後若葉中殘留水分足以供酵素活動時，即生褐變。一般言，細胞死亡之原因有四：

- (1)加熱溫度過高，超過 50°C；
- (2)菸葉過分乾燥，低於 30% 時；
- (3)菸葉長時間放置，超過 70 小時以上時；
- (4)菸葉本身受傷時。

黃色菸葉褐變之原因大體亦可歸納三點：

(1)色澤固定期時，由於高溫或高速脫水，導致細胞死亡，而葉中水分仍足供酵素活動。一般言，酵素最適活動溫度約為 35°C~55°C，15°C 以下作用中止；80°C 以上酵素破壞。水分方面，在 80% 時活動力弱，60% 最適合；30% 以下即呈休止狀態。溫度、

水分與褐變向之關係如表(二)所示。

- (2)穿聯掛聯期間，菸葉受傷。
- (3)菸葉罹患病害時

表(二)、黃變後，含水率，溫度對褐變之影響

含水率	溫度	時間	褐變狀況	備註
20%	各溫度	長時間	否	
30%	45°~50°C	20小時內	否	
30%以上	50°C以上	10小時內	部份	
40~80%	60°C以上	1小時內	褐變	

7.青乾原因之探討：

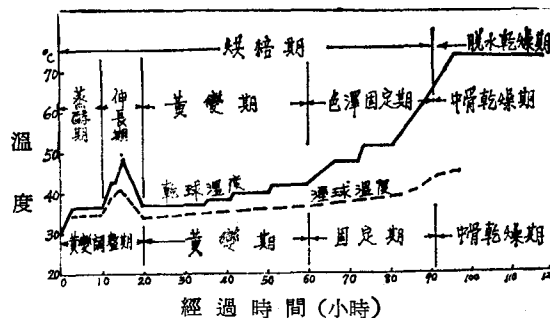
菸葉本身不易黃變，或操作錯誤等均易致青乾現象，未熟葉因葉綠素含量高，易致青乾；其他含水量少，綠色濃度高者，或熟度不均勻者，均易導致青乾。

技術上，操作錯誤亦易導致青乾，諸如溫度、水分之控制，與脫水速率等因素之控制不良等。細胞與酵素最適之活動範圍約在 35°C~40°C，在此範圍之外，均易導致青乾。水分則應控制在 60%，若在 80% 以上或 50% 以下均易導致青乾。其他諸如脫水過早或黃變前水分已降至 50% 以下，均易生青乾之現象。

四、菸葉乾燥之實務

(一)菸葉乾燥之過程

由於菸葉乾燥分數階段進行。每一階段內，溫濕度控制方法亦各不同。其範圍及特有名稱如圖(八)所



圖八、菸葉乾燥時，經歷之過程與名稱。

示。依此操作時間表與葉之狀態可分為：蒸餾期、伸張期、黃變期、色澤固定期與中骨乾燥期。蒸餾期與伸張期合稱為黃變調整期，其主要目的在促進葉中水分蒸發，活動酵素，以便進行黃變。近年來，本省漸

採無伴張法居多。黃變與固定期前面已有說明。兩者需相互配合。固定期技術上較困難，因為已黃變者，色澤須固定，而未黃變者則繼續黃變，故在排濕與昇溫之操作需相互協調。若稍有不慎，葉面黃色不清，易呈褐色及污點；或葉脈線呈暗綠色。色澤與成分方面俱受損失，品質亦將低劣。

(二) 菸葉乾燥之特性

由前節所述有關於葉所具有之種種特性可知：菸葉之乾燥特性與結構有別於其他作物。茲將其相異點歸納如下：

1. 菸葉之乾燥並非單純之脫水工作，因為除水分之蒸發外，尚須顧及葉色之轉變與成份上之變化。因此之故，脫水速率反而並非重要之點。有時甚至由葉片所含水分不足尚須由外面加以補濕。在此種情況之下，空氣溫度與濕度均為調節之因子。由此更加重設備控制上之繁複性，同時乾燥室本身亦需講求氣密，設備費用因此增加。

2. 由於葉片本身呈不規則形狀，使其本身對氣流之抵抗力無法達到均勻之效果。而且菸葉乾燥期間，前後體積變化甚大，乾燥更不容易均勻。

3. 乾燥時間甚長（約 120 小時，5 日左右）。在此期間均須避免熱量之流失。故乾燥室四周牆壁必須具備有絕熱特性，設備因而更加笨重，且需採用定置式。

4. 乾燥操作隨菸葉之品質、葉位與栽培方法而異。因此監視之工作必須全靠人眼判斷，不能差錯，否則品質之差異極大。因此操作技術性高，無法以機械或程式之操作取代之，操作人員工作負擔較重。

5. 由於直火常易使油煙沾污菸葉，故必須採取間接加熱式，其熱效率因此降低甚多。

6. 菸葉所含水分特多，幾乎達 85% 以上，故所用之設備均需良好之防銹處理，因此保養費高。

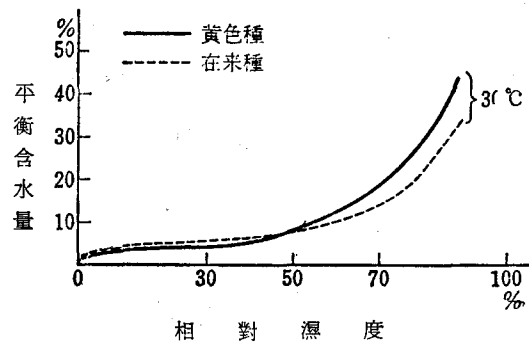
(三) 菸葉乾燥之基本理論

任何物體之乾燥原理總脫離不開空氣之溫度、濕度與風速三因素之變化與物體內部水分之移動特性。菸葉之乾燥自亦不例外。茲就這些因素說明如下：

1. 菸葉內部水分之因應與蒸發：

乾燥之最終意義乃是脫水。脫水之方式很多，菸葉乾燥方面則常採用加熱之方法，使葉中之水蒸氣壓高過周圍空氣中之蒸氣壓。葉面之水分乃自表面蒸發，而葉體內部則因表面水分之減低自亦形成另一股水蒸氣壓差，因此葉內部水分乃向表面擴散。當葉體表面之水蒸氣壓與大氣中之水蒸氣壓相同時，蒸發

作用停止（或空氣中返回葉面之水分與由葉面蒸發之水分相等）。此種狀態謂之水分平衡，在平衡狀態下葉中所含之水分率稱為平衡含水率。葉面與空氣達到平衡狀態時，即顯示乾燥作用終止。平衡含水率與氣溫，相對濕度有一定之關係。此種關係隨品種不同而有差異。圖(九)所示為黃色種與在來種菸葉之平衡狀態



圖九、黃色種與在來種菸葉之平衡曲線

曲線。例如，在氣溫 30°C，相對濕度 70%（濕球溫度 26°C）時，其平衡含水率（或乾燥終了含水率）為 18%。

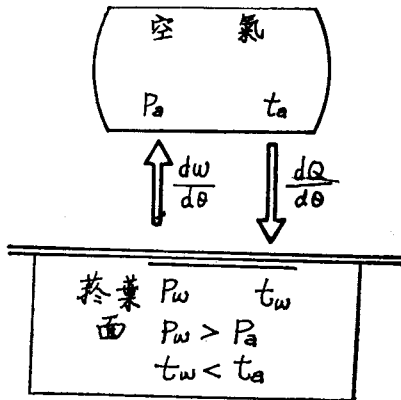
由此觀之，乾燥期間，葉面蒸發與內部水分擴散之情形限制所有之乾燥行為。葉面水分蒸發量與空氣中之溫、濕度與風速有關；而物體內部水分擴散速率則與物體之組織與水分之移動狀況有關。就菸葉而論，其鮮葉中雖含有 85% 以上之水分，但其中有 1/3 係貯存於中骨部份。這種不一致之水分含量使乾燥條件之設定更形複雜。一般言之，菸葉中所含之水分有四種型態：即表面附着水、細胞液腔水、細胞原形質水與其他化學成分之水。菸葉中脫水之對象則以前三者為主。

葉面之蒸發絕大部份經過氣孔。葉肉內部之擴散部份亦靠氣孔。據研究，葉肉內氣孔之數目約為葉面之三倍。乾燥初期，葉面之氣孔常呈閉塞狀態，阻礙水分蒸發。故舊有烤菸室之操作常採伸張法（溫度瞬時升高至 43~48°C），使氣孔張開，蒸發大部份水份。由於中骨集中大部份之水分（以單位面積約 10 倍於葉肉）。因此在乾燥初期，中骨之水分乃經過其維管束組織移向葉肉，以補充葉面已蒸發之水分。唯脫水進行至某一程度後，這些維管束組織即逐漸萎縮，水分之移動乃告中止。自此以後，中骨與葉肉之水份僅能靠擴散作用以補充葉面蒸發。中骨部份之脫水速率遂告遲緩，必須等到葉肉乾燥後施加高溫方能完全乾燥。

2. 乾燥速率之探討：

前面所述，水分蒸發速率受溫、濕度與風速所支配，同時亦受內部水分擴散率之影響。有關乾燥速率之文獻前人亦曾多方探討（註五），其所論雖較廣泛，但仍適用於菸草方面之乾燥。

理論上，水分自液面蒸發係一種質量傳遞與熱傳遞之結果。水分自空氣中取得熱量而蒸發，而蒸發量又受液面與空氣中水蒸氣壓差之限制。其簡單過程如圖(十)所示。設空氣之溫度為 t_a ，濕度則以與其成正比



圖十、葉面水分蒸發之熱傳與質傳之關係

例之水蒸氣壓 P_a 表示；葉片最初溫度為 t_w ，其蒸氣壓為 P_w 。則水蒸氣蒸發之速率與水蒸氣壓力差成正比；熱量則由空氣傳遞至葉片，即

$$\frac{dw}{d\theta} = KA (P_w - P_a) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dQ}{d\theta} = \alpha A (t_a - t_w) \dots\dots\dots (4)$$

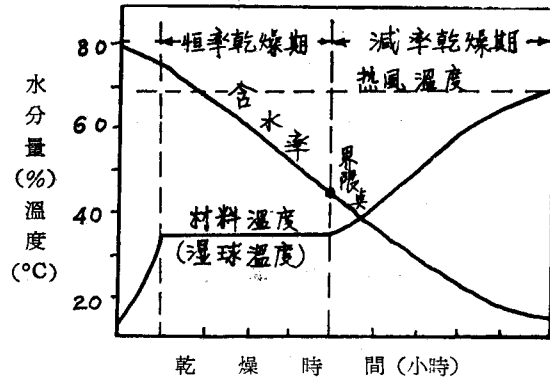
其中， K ， α 各為空氣薄膜之擴散係數與熱導係數， A 為接觸面積。

在乾燥之初期，液面溫度 t_w 低，因此 P_w 亦低，蒸發量較少，故供給葉片之熱量除部份作為蒸發熱外，其餘則供應葉片顯熱 (Sensible heat)，促使 t_w 上升。但 t_w 上升後，水蒸氣壓 P_w 亦隨之增加， $\frac{dw}{d\theta}$ 及根據 (3) 公式增加，但 $\frac{dQ}{d\theta}$ 反而減少，最後兩者將達平衡狀態。此時傳遞至葉面之熱量不再使 t_w 上升，僅供給 $\frac{dw}{d\theta}$ 之氣化熱。設 r 為水分蒸發時所需之氣化熱，則

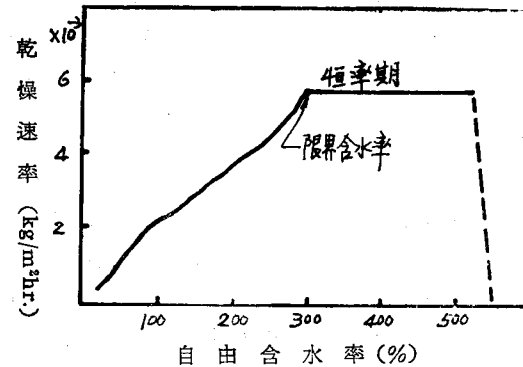
$$\frac{dQ}{d\theta} = r \frac{dw}{d\theta}$$

$$\therefore P_w - P_a = \frac{\alpha}{K \cdot r} (t_a - t_w) = C (t_a - t_w) \dots\dots\dots (5)$$

由公式 (3) 與 (5) 知：蒸發速率與空氣溫度與液面溫度差成正比。在自由水面蒸發時，水面溫度應與空氣中濕球溫度相同。實際上，在於葉乾燥時，由於非全為自由水面蒸發之狀況而需通過葉之表皮層，故 K 、 α 值均較液面者低。維持上述自由水面蒸發速率之乾燥一般稱之為恒率乾燥，如圖(十一)與(十二)。在恒率期



圖十一、乾燥過程中水分含量溫度之變化

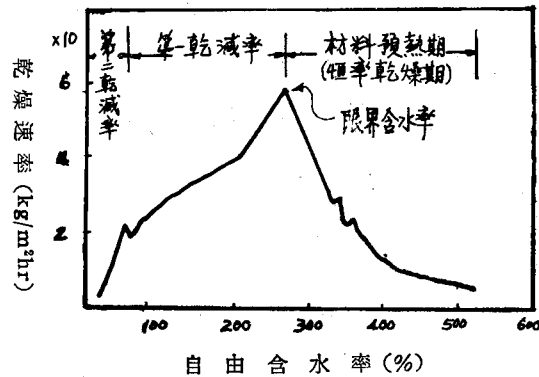


圖十二、乾燥速率與自由含水率之關係

間，濕球溫度維持一定。物體經過恒率乾燥後，降至某含水率時，內部水分擴散因子漸趨明顯，恒率期無法繼續維持，乃開始進入減率乾燥期。此期之乾燥速率與所含之水分成比例。兩期之交點謂之為界限點，其含水率稱為界限含水率 (critical moisture)。界限點有時出現兩處，隨材料而異。水分含量此時繼續下降直至平衡含水率為止。減率乾燥期間，空氣所傳遞之熱量，僅部份供給氣化熱，其餘供材料加溫。故材料溫度不再固定而逐漸上升，至空氣溫度時，乾燥乃告終止。

在於草方面，其黃變、固定與中骨乾燥各期條件

互異，且其乾燥速率之變化亦不易明瞭。惟仍具有上述各種性質，如圖(三)所示。材料預熱期與恒率期因



圖十三、實際菸草乾燥過程速率之變化

溫、濕度之調整而有變化，但大部時間應處於恒率期。界限含水率 200~350 % 左右，大約在黃變期與固定期之間。固定期後即為減率期，至中骨乾燥時，其乾減速率更低，應屬第二段減率期。

在乾燥當中，風速亦是影響乾減速率之因子。風速之大小直接影響公式(3)中之K值。風速大，K值亦大，乾燥速率亦隨之增快。現有大阪式與廣島式烤菸室均以四坪者為多。其空氣之流動係在底部將空氣加熱，使其產生對流。其流量與流速依各期而不同，如表(三)所示。其流速約在 0.08~0.13 m/min 之範

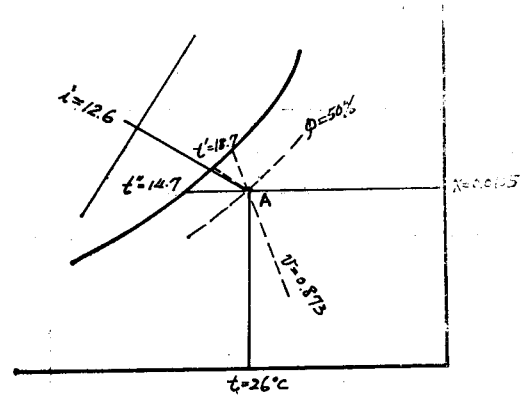
表三、普通乾燥室(四坪)各期之空氣流量

乾燥期間	總排氣量 m³	所需時間 (小時)	室內風量		平均風速 m/min
			m³/hr	m³/min	
蒸餾期	54	10	5.4	0.09	0.0007
伸張期	360	6	61.0	1.0	0.08
黃變期	262.2	19	14.6	0.23	0.017
色澤固定期	4,590	45	100.0	1.7	0.13
中骨乾燥期	1,470	35	42	0.7	0.05

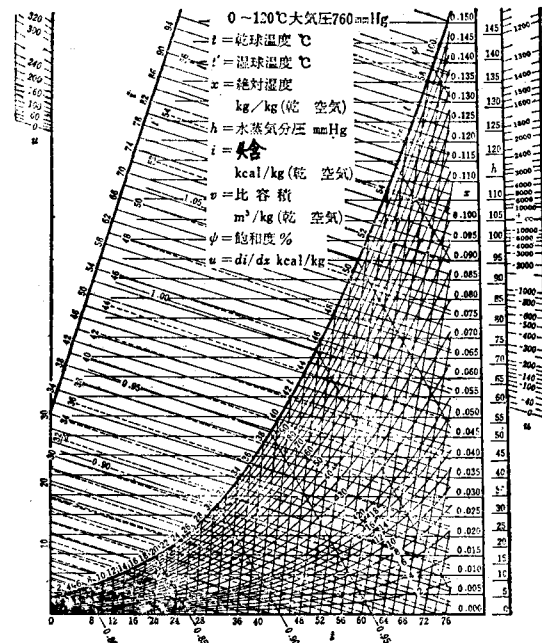
圍。在普通乾燥室，(3)式中之K值約為 0.05gr./kg.hr.mmHg。新型堆積烤菸室之風速則較高，約為 10~20 m/min，其K值約在 0.6gr/kg.hr.mmHg。故(3)式中 $P_w - P_a$ 差若為一定，則堆積型之乾燥速率應比普通型快 10 倍以上，若以乾燥能力言，由於單位面積容量增加，故其能量則應超過十倍以上。

3. 濕氣圖之應用

由於菸葉乾燥着重在溫、濕度之控制，因此，利用濕氣圖解釋各乾燥期之作業狀況較為便利。一般濕氣圖之讀法如圖(四)，正確之濕氣圖如圖(五)。在 A 點



圖十四、濕氣圖之讀法



圖十五、濕氣圖

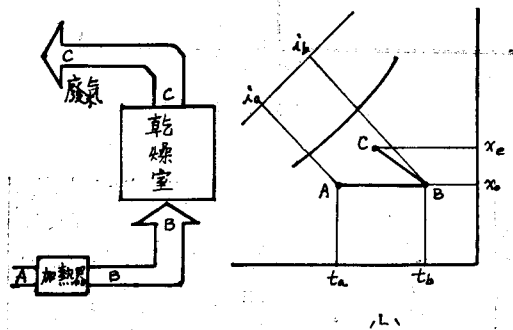
狀態之空氣，垂直而下之實線為乾球溫度線 ($t = 26^\circ\text{C}$)。A點水平左移交曲線於一點為其露點溫度 ($t' = 14.7$)，水平線為等絕對濕度線；右行由垂直軸讀出 (0.0105 kg/kg)。A點左上斜實線 1 為等焓值線 (enthalpy)，其值為 12.6 Kcal/kg，與此實線略近之斜虛線為等溫絕熱線，或為等濕球溫度線 ($t' = 18.7^\circ\text{C}$)，一般乾燥之過程均視同絕熱過程，其變化

與等焓線略同。左上斜虛線為等比容線 ($v=0.873$ m^3/kg)。與實曲線平行者為相對濕度線 ($\phi=50\%$)。濕空氣之加熱或冷卻係沿水平等絕對濕度線進行。

茲將烤菸室所利用之送風方式與濕氣圖配合說明如下：

(一)單向送風方式：

單向送風式為最簡單之乾燥型式。除舊有烤菸室使用外，其他穀物之乾燥諸如稻谷、花生、玉米、大豆等大部份均採取此種型式。此型式最大特點是熱氣通過乾燥室後即予排出，不再利用。其概念如圖(a)。



圖十六、單向送風型之概念及其濕氣狀態

由於熱空氣僅通過於葉乙次，故每公斤空氣所能蒸發之水分量較低。而排棄之空氣其顯熱之損失大。根據圖(十六 b)，每 kg 空氣所能帶走之水分為 $(x_e - x_o)$ kg，其所需加入之熱量則為 $(i_b - i_a)$ kcal/kg。設每小時所需之熱量 q_s ，則

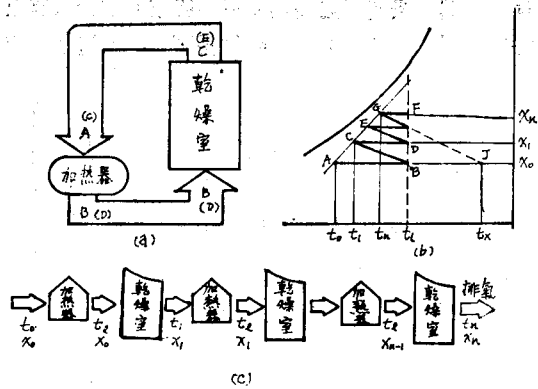
$$q_s = G (i_b - i_a) \dots\dots\dots (6)$$

此處， G 為空氣量(kg/hr)。

(二)密閉加熱循環方式：

由於單向送風方式損失之顯熱多，若能將通過乾燥室之空氣收回再加熱，則效率必大為增高。新型烤菸設備在黃變初期常採用此種密閉循環方式，或採部份循環，故其熱效率高。

閉路加熱循環之概念如圖(十七 a)，作用程序如圖(c)。最初內部設為外氣狀態，經加熱後，通過乾燥室再返回加熱器加熱。如此反覆循環。空氣每次經過加熱器後，其溫度均為 t_s ，由恆溫器控制。此溫度必需屬於被乾燥材料所容許之範圍內。



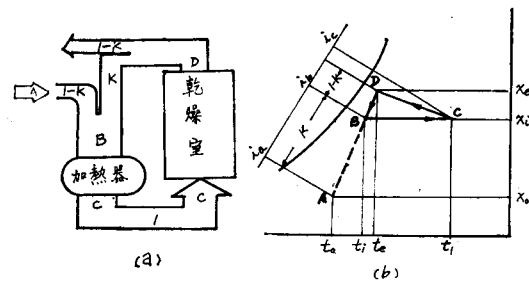
圖十七、閉路加熱循環之概念與程序

圖(b)中，水平部份AB、CD、EF等均屬加熱過程；斜線BC、DE、FG，則屬絕熱乾燥過程。由A點展轉至G點，每公斤空氣可蒸發 $(x_n - x_o)$ kg 水。單向送風型若欲達此能量，其風量需為此型式之 $(x_n - x_o) / (x_1 - x_o)$ 倍方克達成，但此時之顯熱損失更大；或者將同量空氣溫度提高至 t_x (即J點)始克完成，但此時 t_x 溫度可能已超過材料容許值。

理論上，經過無限次之再循環後， t_n 溫度將趨近於 t_s ，因此失去乾燥能力。在密閉循環或黃變初期常有此狀態點出現，此時由於天花板較冷，故水蒸氣常於其上凝結。有些則凝結於葉面，顯然在A、C、E、G等狀態點中，部份已往右移而有與露點溫度線重合之情形。

(三)部份收回之循環方式

前述之閉路循環方式只能應用於黃變期之特殊狀態，而採分段排濕之方法。實際上有相當多之場合僅採用廢氣部份收回再加熱，而部份排出之方法。此時收回之廢氣必須配合一部份新鮮空氣，混合之後再加熱，然後送回乾燥室。其過程如圖(a)所示。設風車本



圖十八、部份收回循環之概念

身之循環風量為 G kg/h，而排氣量為 g kg/hr時，則相當於閉路循環加熱 G/g 次。

設乾燥室內空氣循環量為 1，其中 K 部份廢氣收回再循環，而 (1-K) 之廢氣排出室外。此時進入 A 處補充之外氣量亦應為 (1-K)。是故 B 點之狀態應為 K 量之廢氣與 1-K 量之新鮮空氣所混合，因此，B 狀態點應有如下之關係（參照圖 b 之濕氣圖所示）：

$$\begin{aligned} t_B &\Rightarrow k(t_D) + (1-K)(t_A) \\ x_B &\Rightarrow k(x_D) + (1-K)(x_A) \\ i_B &\Rightarrow k(i_D) + (1-K)(i_A) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

在濕氣圖中，B 點為 A 與 D 兩狀態之混合，再由 B 加熱至 C，然後進入乾燥室，沿 CD 之絕熱線乾燥至 D 點。

設空氣總循環量為 G kg/min (或為 Gv CMM)，則排氣量應為 G(1-K) kg/min。在加熱過程中所需之熱量為 $Q = G(i_c - i_b)$ kcal/min。乾燥室中水分之蒸發量 $E = G(x_c - x_1)$ kg/min = $G(1-k)(x_c - x_0)$ kg/min = $g(x_c - x_0)$ kg/min。

依據上述之方法與公式應可計算菸葉乾燥各期所需之風量。

[例]：設黃變期外氣溫度乾球 28°C，濕球 25°C，回收空氣乾球 38°C，濕球 37°C，加熱後乾球 40°C，濕球 37°C，經過 18 小時，脫水 90.2kg (估計)，則

1. 每分鐘水分乾減量 = $\frac{90.2}{18 \times 60} = 0.0835$ kg/min
2. 加熱後之絕對濕度 = 0.039 kg/kg 乾空氣
3. 回收空氣之絕對濕度 = 0.040 kg/kg 乾空氣 }
(由濕氣圖)
4. 脫水能力 = 0.040 - 0.039 = 0.001 kg/kg
5. 最低風量 = $\frac{\text{每分乾減量}}{\text{脫水能力}} = \frac{0.0835}{0.001} = 83.5$ kg/min
6. 比容 = 0.945 m³/kg

7. 最低風量 = 83.5 × 0.945 = 79 CMM

8. 外氣絕對濕度 = 0.0188 kg/kg

9. 新鮮空氣比 = $\frac{0.040 - 0.039}{0.040 - 0.0188} = 4.7\%$

五、結 論

菸葉乾燥是一種較為特殊之乾燥方式，它不僅要脫除鮮葉中之水分，而且要在水分脫除過程中，促進其黃變以及化學成分之變化。進而固定菸葉之色澤。此為一般乾燥法所無者，因此其烤製工作也特別繁複與辛苦。

由於菸葉烘烤之時間長達 120 小時以上，這期間必須有操作人員時時妥加看顧，並且憑其經驗與技術，調節乾燥過程中之溫、濕度之變化。偶有失誤，不但損及菸葉品質，而且常易釀成火災。

近年來，溫、濕度自動控制方面在工業上已有極大之成就，並廣泛被使用，其價格亦不甚昂貴。因此，利用自動控制方式配合新式堆積烤菸法已逐漸在歐、美、日演變為一種趨勢。惟乾燥期間，各期之控制條件仍然瞬息萬變，必須時加調整。故就目前情況而論，仍無法達到完全自動化之地步。

本文主要之目的，旨在探討有關菸葉乾燥方面之理論與實際之應用，作為今後舊有烤菸室改善之參考與依據。

六、參 考 資 料

1. 材岡洋三 タバコの乾燥法 農山漁村文化協會。
2. _____ 農業要覽第七輯——菸草 47 年農林廳編印。
3. _____ 循環バルク乾燥の ABC 木原製作所。
4. 丁銀謀、陳錫九：臺灣菸草之改進 民國 47 年。
5. 沈國文：谷物貯藏與乾燥、農工學報。
6. B. K. Huang Immediate Solar-Energy Utilization Using Green-house-bulk curing & Drying System, report.
7. _____, バルク乾燥編 日本專賣公社 1947。

七、Summary

Method for tobacco curing and drying is a kind of extraordinary one. It proceeds not only to get ride of moisture out of the flesh leaves, but also to motivate the yellowing of the leaf appearance and its chemical changes during the drying period and, also, to keep its color from changing after yellowing. All these procedures are considerably complex and arduous and are seldom found on drying of other crops.

Because the time consumed in tobacco curing and drying will totally last 120

(下接第 7 頁)