

**The Present Status of Rice Drying  
and Storage in the U.S.A.**  
**(미국에서의 벼 건조 및 저장현황)**

**Fred W. Bakker-Arkema**

- Professor of Agricultural Engineering at Michigan State Univ. (MSU)
- Head of grain-processing laboratory at MSU
- President of the Processing Division of CIGR
- Consultant to World Bank and FAO

**R. Hines**

- President  
MFS /York, Inc.  
Grand Island, Nebraska, U.S.A.

# The Present Status of Rice Drying and Storage in the U.S.A.

(미국에서의 벼 건조 및 저장현황)

**Fred W. Bakker-Arkema and R. Hines**

Department of Agricultural Engineering, MSU and MFS /York, Inc.

## SUMMARY

The state-of-the-art of rice drying in the U. S. A. is presented. The U. S. A. is a minor producer but major exporter of rice. Head yield is its major criterion in evaluating rice quality. A decrease of 1 to 3 points in head yield can be expected to occur in a well-designed rice-drying system. Rice is dried on the farm in bins in the U. S. A., and in high-temperature continuous-flow dryers at the elevator level. Two relatively new rice-drying systems are discussed in some detail: the top-bin/in-bin-counterflow bin-type on-farm dryer, and the concurrent-flow high-temperature elevator dryer.

## I. Introduction

The U. S. A. is one of the major grain producers in the world. In the early nineties, the world production of the three major cereals-maize, rice and wheat-had stabilized in the range of 1,300~1,400 million metric tonnes (MMT); during that period, the world production of soybeans was 110-120 MMT. As the figures in Table 1 show, the U. S. A. is a principal producer of maize, soybeans and wheat, but not of rice.

Table 1. Production (MMT) of major grain crops in the U.S.A. and the world in 1990-1991.

	U.S.A.	WORLD
MAIZE	201	470
RICE	7	518
SOYBEANS	52	115
WHEAT	79	592

Source : USDA (1993).

Tables 2 through 7 provide data on the world production and trade, the world-market prices, and the world stocks of rice in the last 3~5 years. Korea and the U. S. A. produce similar quantities of rough rice; China is by far the largest producer (see Table 2). Long-grain rice is the major type grown in the U. S. A. (see Table 3). Thailand and the U. S. A. are the two major rice-exporting countries (see Table 4). The U. S. A. at present exports the bulk of its rice in milled and parboiled form (see Table 5). The world-market prices of rice have changed little in the last five years except in the last 12 months (see Table 6); the world stocks of rice have steadily declined during that period (see Table 7).

Rough rice is harvested in the U. S. A. at an average moisture content between 16% and 28%, depending on the type of rice, the number of the cutting, and the growing location. In California, medium- and short-grain rice are normally harvested at 20~26% moisture, second-cutting long-grain rice in Texas at 16~18%. In general, at the higher harvest moistures, the grain yield

Table 2. Rice production (MMT) in different countries.

	KOREA	JAPAN	U.S.A.	CHINA
1988 /89	8.4	12.4	7.3	169.1
1990 /91	7.7	13.1	7.1	189.3
1992 /93	7.3	13.2	8.1	186.2
1993 /94	6.4	10.3	7.5	177.1

Source: *World Grain* (1994).

Table 3. U.S. production (MMT) of long and medium/short rice.

	LONG	MEDIUM /SHORT
1988 /89	5.3	1.8
1990 /91	4.8	2.1
1992 /93	5.7	2.7
1993 /94	5.2	2.2

Source : *World Grain* (1994).

Table 4. Rice exports (MMT) of the U.S.A. and Thailand.

	U.S.A.	THAILAND
1988	2.2	4.8
1990	2.4	3.9
1992	2.1	4.8
1993	2.5	4.3

Source : *World Grain* (1994).

Table 5. The type of U.S. rice exports (MMT).

	ROUGH	MILLED	BROWN	PARBOILED
1988 /89	0.1	1.4	0.3	0.8
1990 /91	0.2	0.8	0.4	0.8
1991 /92	0.2	0.7	0.3	0.8

Source : USDA (1993).

Table 6. The world-market prices (\$/MMT) of different types of rice.

	LONG	MEDIUM	SHORT	BROKEN
12 /88	210	194	192	105
12 /90	182	161	160	91
12 /92	190	172	171	95

Source : USDA (1993).

Table 7. World rice stocks (MMT).

1988	47.8
1990	59.5
1992	52.4
1993	44.9

Source : *World Grain* (1994).

and head yield are maximized.

Considerable moisture has to be removed from grain during drying. Over 100 kg of water is removed in drying rice from 25% to 15% moisture content, requiring over 125,000 kcal. Natural gas and LP-gas are the major energy sources in the U. S. A. ; oil and coal are employed infrequently.

In drying rice, one has to be aware of the potential nonuniformity of the moisture content in a lot. At harvest time there may be a significant difference in moisture content between the most mature and least mature kernels on one plant; variations up to 20% moisture are not uncommon between the grains from the top of the most mature panicle and the kernels from the bottom of the least mature panicle. Fortunately for the dryer operator, the percentage of ultrahigh moisture-content kernels in a lot is relatively small. Table 8 tabulates the moisture content distribution of five size fractions in a freshly harvested sample of Texas long-grain rice; the average moisture content is 19.8%, but 21.5% of the kernels (mostly the thinner grains) are over 20.1% moisture, and 4.5% are over 23.1% moisture.

In some rice growing areas in the U. S. A., rice from individual growers is dried and stored in separate bins as identity-preserved rice. This practice is followed in Texas with long-grain rice. Drying of an identity-preserved rice is

facilitated by the fact that the average moisture content across a lot of rice is usually fairly uniform. In California, rice from a variety of growers is commingled at warehouses before drying and storage; the difference in the average moisture content within commingled lots can be as much as 8~10 percentage points. Drying of commingled rice leads to partial overdrying of the drier rice and, thus, usually to a decrease in head yield.

Table 8. Moisture content distribution of five fractions in a freshly harvested sample of *long-grain* rice at an average moisture content of 19.8% (w.b.).

SCREEN SIZE (mm)	AMOUNT RETAINED (%)	MOISTURE CONTENT (% w.b.)
1.98 × 12.70	78.5	19.2
1.93 × 19.05	7.0	20.1
1.78 × 12.70	10.0	21.2
1.63 × 9.53	3.6	23.1
1.55 × 12.70	0.9	27.1

Source : Chau and Kunze (1982).

## II. Rice Quality

The quality characteristics of rice to be maintained during the drying process are the head yield, the color, and the cooking qualities. The head yield of rice is especially sensitive to the mode of drying, and is usually used in the U. S. A. in assessing the success or failure of a rice drying system. [*Note : head yield is defined as the percentage of whole milled kernels in a lot of rough rice.*]

The head yield of rice varies with variety, average moisture content at harvest, and climatic conditions. In California, the average head yields over a seven-year period (1979~1985) for very early, intermediate, and late varieties of medium-grain rice were 52.0%, 53.8%, and 57.4%, respectively. The maximum head yield of medium-grain varieties was obtained at 21~23% harvest moisture content, of long-grain rice types at 18~20%. Fig. 1 shows the head rice yield of long-grain, medium-grain, and short-grain, rice as a function of moisture content at harvest. A decreased head yield can be expected when rice is harvested at temperatures above 32°C. In Texas, the maximum head yield of long-grain rice is obtained in the 20~22% moisture content range; when it reaches 16 to 18%, the proportion of fissured grains increases significantly with an accompanying sudden decrease in head yield.

The head yield of a lot of rice increases if drying is postponed for a day in order for the internal moisture gradients in the kernels, and the different

moisture contents between the individual kernels, to equilibrate. An increase in head yield of about one percentage point can be expected; postponing the drying treatment beyond 24 hours does not affect the head yield.

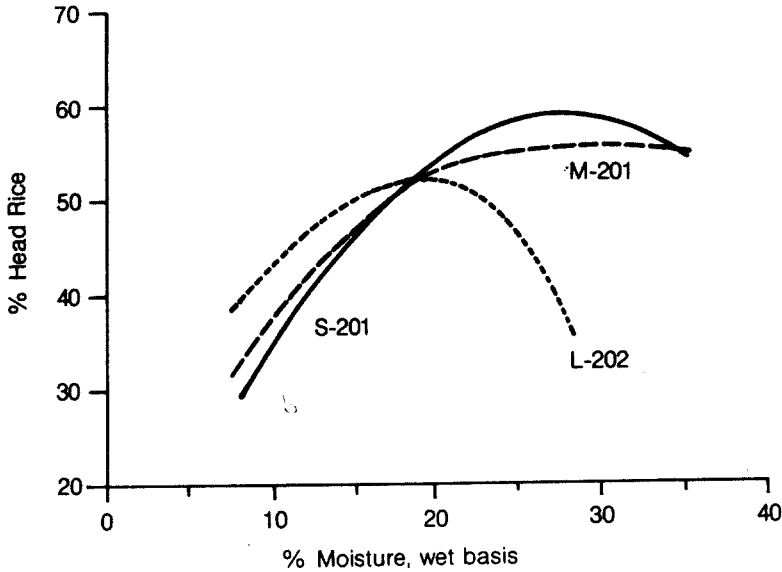


Fig. 1. Head yields of the *long-grain* variety L-202 compared with the *short-grain* variety S-201 and the *medium-grain* variety M-201 when harvested at various moisture contents.

The objective of the rice drying process is to maximize the drying capacity of a rice dryer at a minimum loss in head yield and a minimum consumption of energy, without affecting the color and cooking characteristics of the rice. Drying rice slowly to 13.5% in successive 15- to 20-minute periods at air temperatures between 25°C and 35°C and relative humidities between 55% and 65%, with intermittent tempering of 4~6 hours, minimizes the head yield loss. For this reason, this combination of drying conditions is often employed in the U. S. A. by dryer operators in laboratory sample dryers to establish the initial (i.e., the identity) head yield and total yield of a rice lot to be dried.

During commercial rice drying in the United States, the head yield can be expected to decrease 1 to 4 percentage points while the total yield remains unchanged. For instance, in a typical crop year (1983~84) at five California warehouses which processed medium-grain rice by multi-pass crossflow drying, the head yield decreased 2.6% to 4.3%, and the total yield changed from + 1.8 % to -2.3% (unpublished authors' data).

The difference in price between whole and broken rice kernels depends on the year, the size of the broken, and on the country. In the United States in

the 1980s, the value of broken rice was 57~63% of that of head rice. Thus, it behooves the dryer designer and operator to minimize the head yield loss in drying rice from harvest to the safe storage moisture content. A decrease of 2 to 3 points in head yield constitutes a realistic design objective for a rice drying system.

### III. Bin Dryers

Bin dryer systems in use in the U. S. A. include: (1) full-bin natural air and low-temperature drying, (2) layer drying, (3) in-bin counterflow drying, and (4) in-bin batch drying. Each of these designs can include a stirring device and/or a recirculator. Each of these systems is shown in Fig. 2.

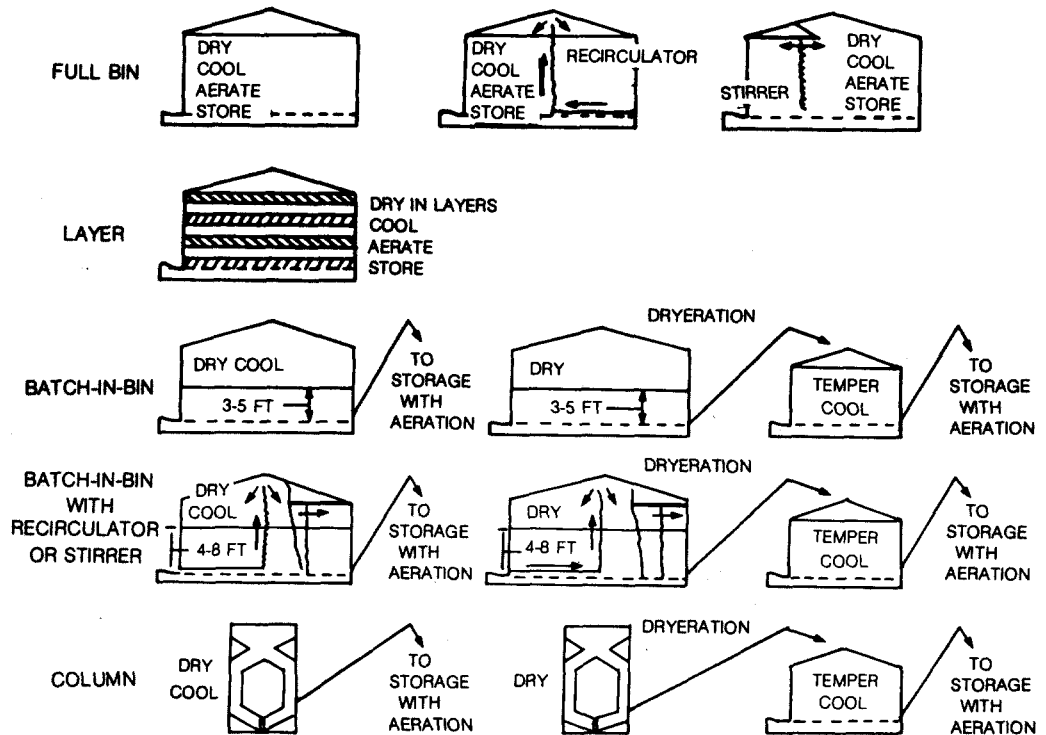


Fig. 2. On-farm in-bin and non-bin grain drying systems (Brooker et al., 1992).

#### 1. Full-Bin Drying

*In-bin natural-air and in-bin low-temperature dryers* are similar in design. Both are full-bin dryers in which wet grain is placed in the bin to a depth of 2.5 to 5.0 meters and is slowly dried using an external fan as the airflow source (see Fig.

3). The natural air dryer used ambient air, the low-temperature dryer employs slightly heated ( $\Delta T = 3$  to  $5^{\circ}\text{C}$ ) air. Both systems produce high-quality grain at a relatively low throughput, if properly operated. The rate of airflow and the relative humidity of the air entering the grain mass are critical to the success of the two systems. The required minimum values of the airflow and the relative humidity depend on the initial rice moisture content, the harvest date, the environmental conditions during the drying process, and the location. Table 9 shows the minimum airflow requirements for the in-bin natural-air drying of long-grain rice in Arkansas. The data illustrate the significance of the initial moisture content on the airflow-rate selection, In evaluating the figures in Table 9, it should be understood that the values are location dependent, and thus do not apply to other rice-growing regions (i.e. California or Korea).

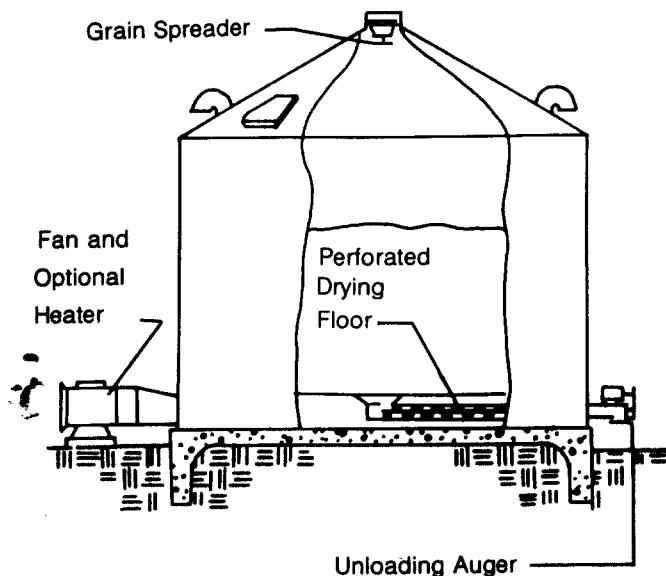


Fig. 3. In-bin natural-air/low-temperature rice dryer (MWPS, 1989).

Table 9. Recommended airflow for the in-bin natural-air drying of *long-grain* rice in Arkansas.

MC INITIAL (% w.b.)	AIRFLOW (m <sup>3</sup> /min. tonne)	MC INITIAL (% w.b.)	AIRFLOW (m <sup>3</sup> /min. tonne)
15 ~ 18	2	20 ~ 22	4
18 ~ 20	3	above 22	6

Source : Siebenmorgen et al. (1991).



*Stirring devices* are frequently employed with in-bin natural-air and low-temperature rice drying systems. They generate a mixing of the bin content every 24 to 48 hours. Stirring alleviates the problem of overdrying of the bottom grain layers in the bin, increases the airflow through the rice by about 10%, and prevents a steep moisture gradient from occurring in the bin. Perforated bin-wall liners are recommended in order to eliminate condensation, and to strengthen the bin walls.

*In-bin layer drying* is similar to natural-air drying, and has comparable airflow requirements. Rather than filling a bin at one time with wet rice, successive layers are placed in the bin after the preceding layer has almost reached the desired moisture content (see Fig. 2). Like natural-air and low-temperature drying, layer drying is a low-capacity system; it varies in its optimum operating conditions with locality and crop type/condition, and requires considerable operator expertise.

*In-bin counterflow drying* is a relatively new process. It can be designed as a one-bin grain-recirculating system, but usually consists of two or more bins (see Fig. 4). Wet rice is loaded in the top of the in-bin counterflow drying bin, and is intermittently removed in thin layers by a tapered-auger located at the bottom of the bin. The partially-dried, hot rice is moved to a second bin for slow in-bin final drying and cooling. The airflow rates and drying-air temperatures in an in-bin-counterflow system are higher than in-bin natural-air and in-bin low-temperature dryers because the grain is subjected to the warm air only for a limited period (i.e. minutes instead of hours or days) in the counterflow system.

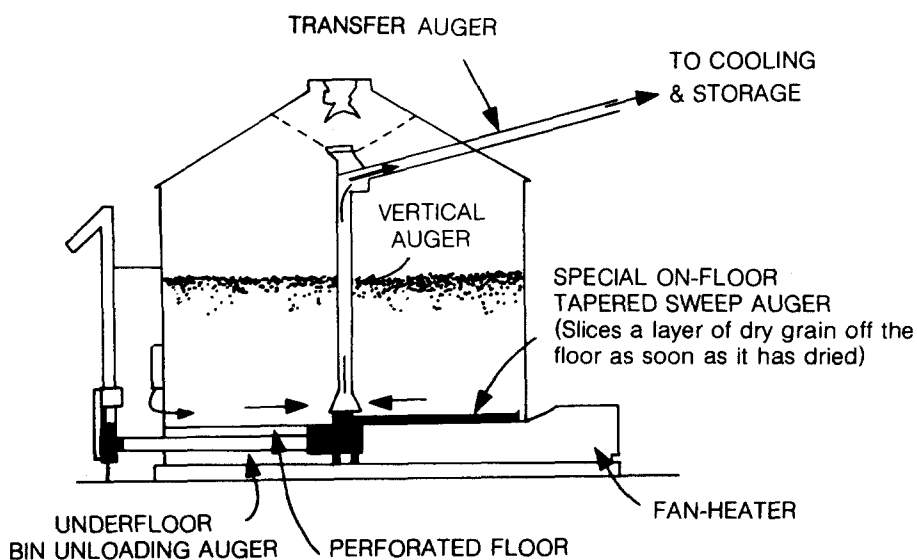


Fig. 4. In-bin counterflow grain dryer.

*In-bin batch drying* dry grain in batches of limited thickness (0.3~1 m) under relatively high-airflow and high-temperature conditions. During the drying process, the rice batch can be located either on the perforated bin floor (see Fig. 2) or on an elevated drying floor in the top of the bin (see Fig. 5). The airflow rate and drying-air temperature of in-bin batch dryers are similar to those of in-bin counterflow dryers, i.e. 5~10m<sup>3</sup>/min. tonne and 35~45°C.

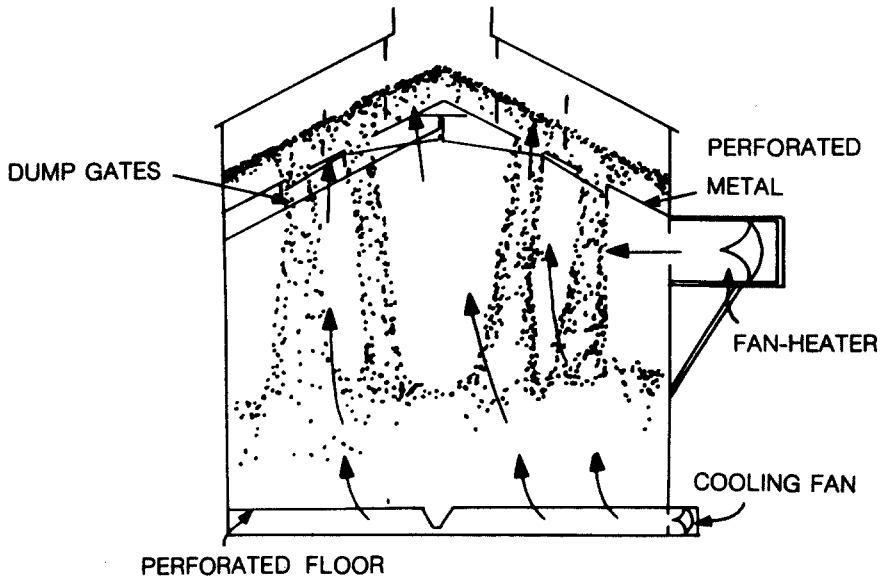


Fig. 5. Top-bin rice drying system.

A recent in-bin rice-drying design is the so-called *top-bin/in-bin-counterflow system* which combines top-bin drying with in-bin-counterflow and in-bin ambient drying. Fig. 6 shows the layout of the system. It consists of a hopper-type receiving bin, three top-bin intermittent-flow/in-bin continuous-flow drying bins, and two in-bin aeration/storage bins, placed in series. Each drying bin contains a top-bin (TB) dryer in the top of the bin, and an in-bin counterflow (IBCF) dryer at the bottom of the bin. Thus, high moisture content rice is subjected to six drying and one aeration treatments during the drying/aeration process. Typical conditions for operating the TB/IBCF system in drying rice from 24% to 13% are tabulated in Table 10. The grain-depth in the TB dryer in each drying bin is 0.3 m, and 1.5 m in the IBCF dryer. The tempering time between the TB and IBCF drying treatments is 7.5 hours. Thus, the total drying time in the TB/IBCF 3-bin system is 27 hours in drying rice about 10 percentage points of moisture.

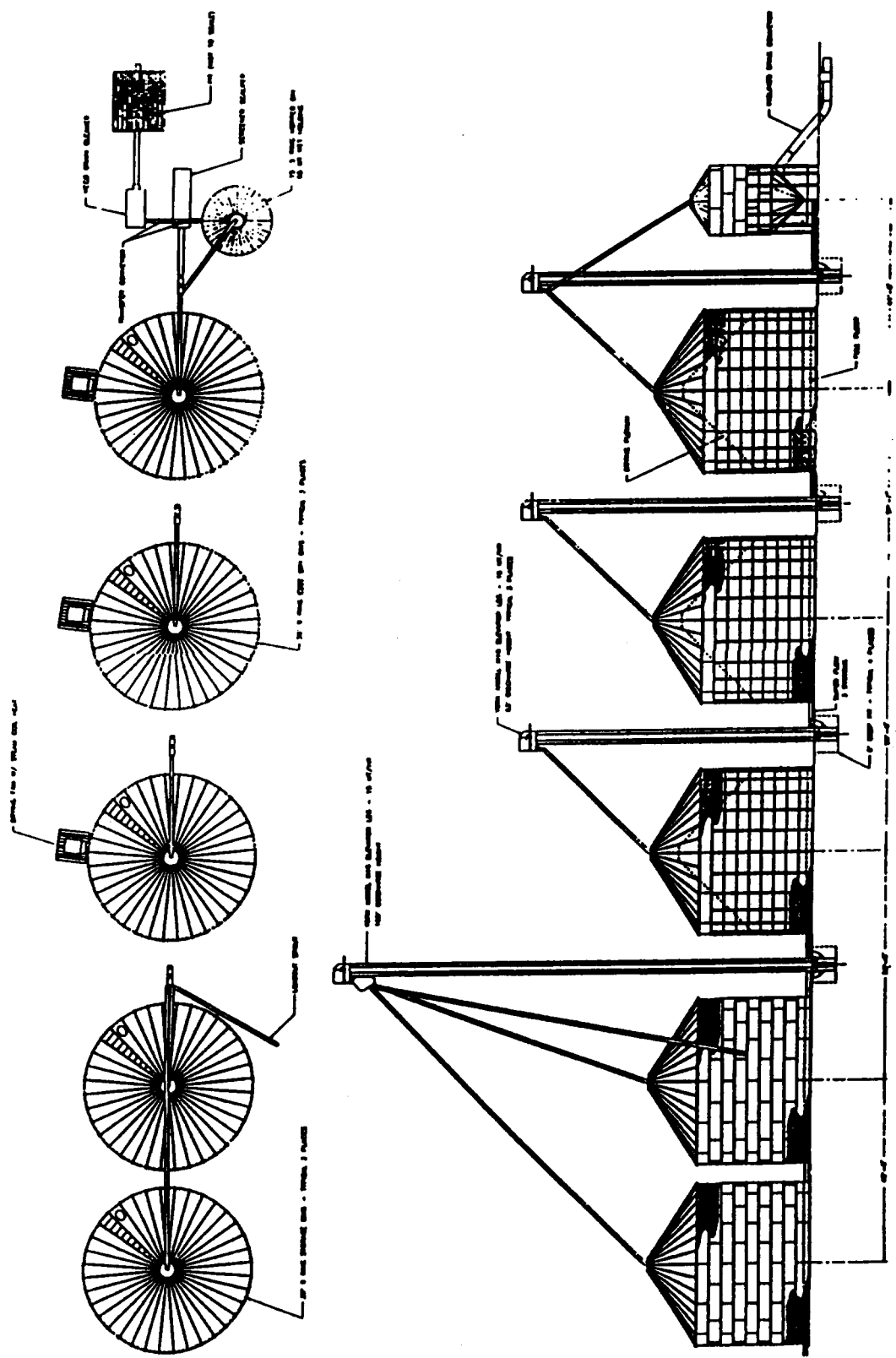


Fig. 6. TB / IBCF rice-drying system.

Table 10. Approximate operating conditions of the TB/IBCF drying system in drying long-grain rice from 24% to 13% (w.b.).

AIR/GRAIN CONDITION	BIN 1		BIN 2		BIN 3	
	TB	IBCF	TB	IBCF	TB	IBCF
AIR TEMP (°C)	52	27	46	27	41	27
AIRFLOW (m <sup>3</sup> /min, tonne)	50	1	50	1	50	1
OUTLET MC (AVERAGE, %)	20	19	16	15	13.5	13
OUTLET TEMP (AVERAGE, °C)	41	27	39	28	37	28

Source : Bakker-Arkema and Hines (1993).

## IV. Continuous-Flow Dryers

Three continuous-flow drying systems are employed in the U. S. rice industry: crossflow, mixed-flow and concurrent flow/counterflow dryers. Each type is schematically illustrated in Fig. 7.

Rice is dried in several passes in a continuous-flow dryer in order for the rice to maintain a high head yield. The tempering time between successive drying passes is 1-24 hours, depending on the average rice temperature and the rice temperature uniformity. The logistics of multi-passing is complex because a sufficient number of bins has to be available to allow the tempering of the partially-dried rice with kernels at different moisture contents for the required period of time.

### 1. Crossflow and Mixed-Flow Dryers

The distinguishing design of *crossflow rice dryers* is the perpendicular direction of the kernels and the drying air. This results in non-uniform drying of the rice. Recent improvements in the basic crossflow design have improved the grain-quality characteristics. In a conventional crossflow dryer, the discharged air is only partly saturated. Recycling part of the drying air, and all of the cooling air, significantly decreases the energy requirement. Along with air recycling, airflow reversal has been incorporated in many crossflow dryers in order to offset the moisture and temperature differentials in the grain column (see Fig. 8). Placing one or more grain inverters in the grain column is similarly

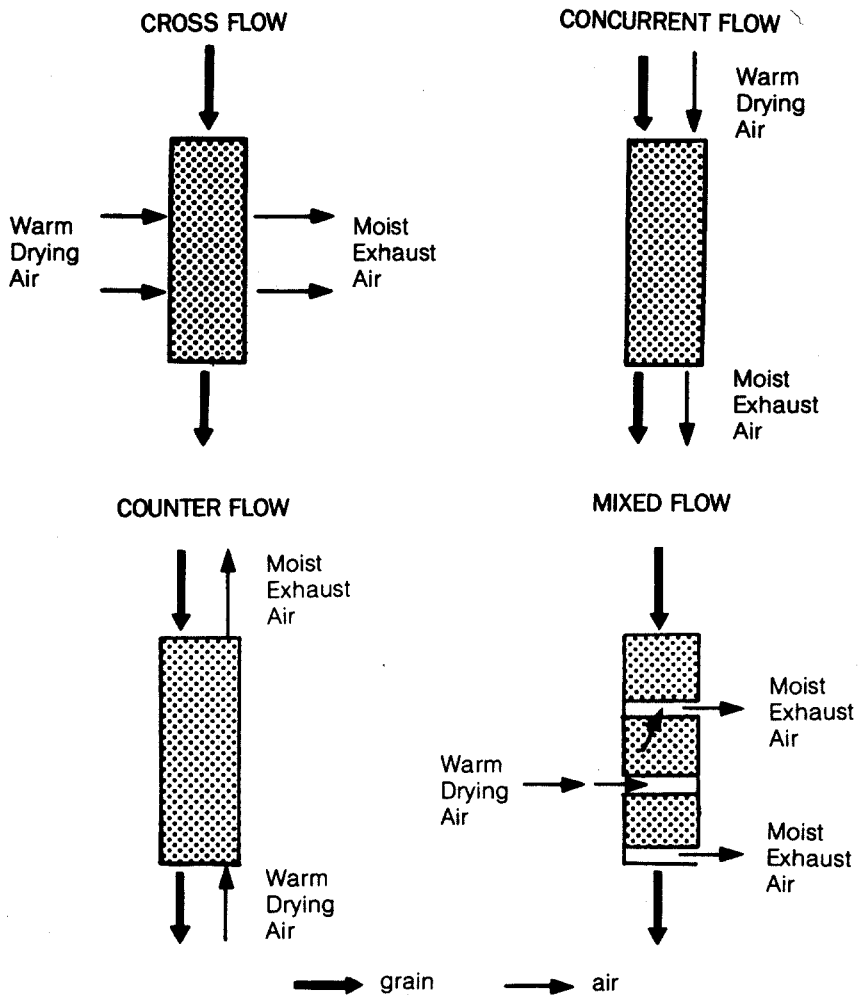


Fig. 7. Schematic of the four continuous-flow rice drying/cooling systems.

effective. Grain inverters turn the overheated grain at the air-inlet side to the air-exhaust side of the column, and thus lessen overdrying /overheating.

In a *mixed-flow dryer*, the rice kernels are dried by a mixture of crossflow, concurrent flow and counterflow processes. The rice flows over a series of alternate inlet and exhaust air ducts (see Fig. 9). This results in fairly uniform drying, and therefore a relatively uniform rice moisture content and quality. The drying temperature in mixed-flow dryers is higher than in crossflow ones because the rice is not subjected to the high temperature for as long.

Crossflow rice dryers (also called columnar dryers in the rice industry) are the most popular in the united states; mixed-flow dryers are used elsewhere in the world. Slightly higher drying-air temperatures are used in mixed-flow rice dryers (i.e. 40~45°C) than in crossflow models (i.e. 35~40°C).

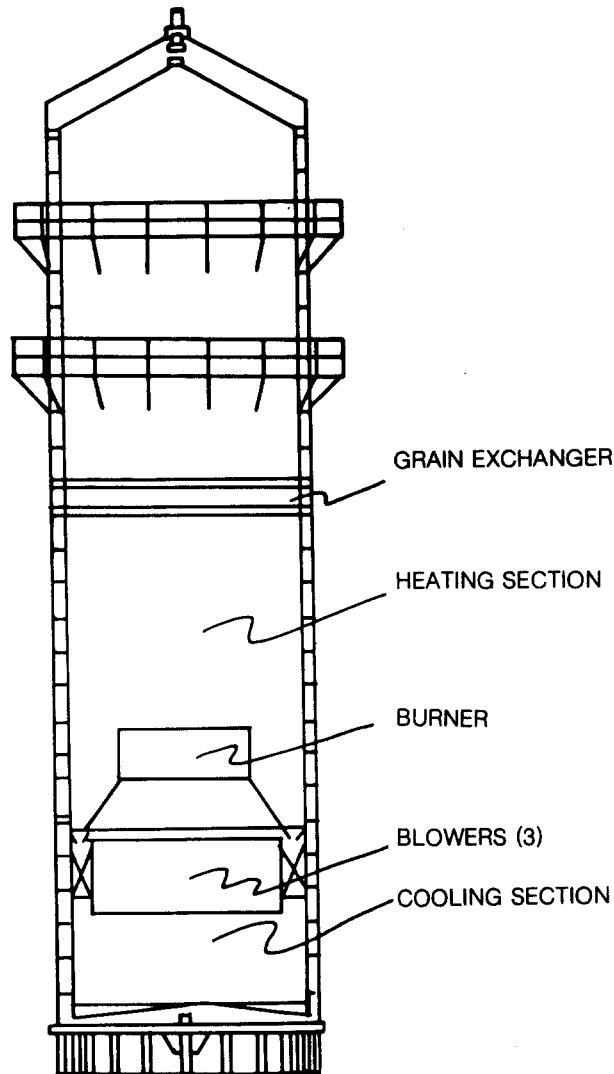


Fig. 8. Crossflow rice dryer with grain exchanger and cooling-air recirculation.

In general, the amount of moisture removed from rough rice per pass in a crossflow or mixed-flow dryer should be limited to 1.0~2.0 percentage points (w.b.). Only during the first pass, since the rice is cool and relatively high in moisture and the drying-air temperature is 50~60°C, is this value increased to 2.5~3 percentage points. The retention time of the rough rice in these dryers should not exceed 20~30 minutes per pass; the exit kernel temperature should not surpass 35°C. Due to the nonuniformity of the dryer-exit kernel moisture content, the tempering time between passes in crossflow and mixed-flow dryers is usually selected to be 6~24 hours.

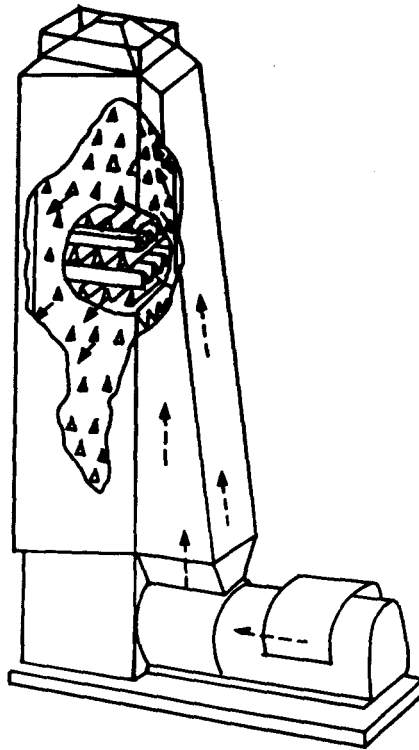


Fig. 9. Mixed-flow rice dryer.

The drying of medium-grain rice from a moisture content of 24.9% to 13.6% in a commercail crossflow dryer under California conditions is illustrated with an example in Table 11. Eight passes were required; in the last pass, the rice was cooled to ambient temperature. The rice remained in the dryer for 21 minutes during each pass. The drying-air temperature was 36~40°C, except in the first pass when 58°C was employed; the average temperature of the rice exiting the dryer was 35°C. The rice was tempered for at least 24 hours between passes. The head yield decreased from 56.9% to 55.2%; the total yield did not change.

Rice is usually dried in crossflow and mixed-flow dryers in fewer than eight passes. Even 25% moisture content rice is dried by most dryer operators in no more than five or six passes, even though the decrease in head yield is, in general, lessened by increasing the number of passes. The additional cost of an extra drying pass has to be weighted against the higher price to be received for the rice.

## 2. Concurrent/Counterflow Dryers

A concurrent /counterflow dryer has one or more concurrent-flow drying

Table 11. Multi-pass drying of *medium - grain rice* in a commercial *crossflow* dryer.

PASS NO.	AIR TEMPERATURE (°C)	MC (% w.b.)	HEAD YIELD (%)	TOTAL YIELD (%)
0	—	24.9	56.9	68.0
1	58	22.1	—	—
2	40	20.5	—	—
3	38	18.8	—	—
4	38	17.4	56.6	68.2
5	38	16.3	—	—
6	36	15.1	—	—
7	36	14.2	—	—
8	22	13.6	55.2	68.0

Source : Unpublished data of tests by the author.

sections, and one counterflow cooler. In a concurrent-flow section the grain and drying air flow in the same direction, in the counterflow cooler in the opposite direction. With the exception of a small one-stage on-farm concurrent-flow (CCF) model, concurrent-flow rice dryers have two or three concurrent-flow drying zones. A tempering zone is located between successive drying sections. Fig. 10 is a schematic of a two-stage concurrent-flow rice dryer with counterflow cooling; a tempering section is located between the two drying stages.

The most distinguishing feature of the concurrent /counterflow dryer is the uniformity of the drying process. Every kernel undergoes the same heating /drying/tempering/cooling treatment, unlike in crossflow and mixed-flow dryers. The drying-air temperature is much higher than in the other dryers because the wet rice is subjected to the hot drying air not for hours (crossflow dryers) or minutes (mixed-flow dryers), but only seconds. Therefore, the rice does not equilibrate to the temperature of the drying air, as it does in the two other dryer types.

The uniform, relatively gently drying and cooling processes in CCF dryers, and the built-in tempering treatment(s), result in dried rice of superior quality. The head-yield of rice dried in CCF dryers is generally higher than that of rice dried in mixed-flow and crossflow dryers.

The drying-air temperatures in a CCF rice dryer are 65~175°C, and thus are substantially higher than in crossflow and mixed-flow rice dryers. To maintain the quality of the rice, the maximum amount of moisture to be evaporates in one CCF drying stage should not surpass 1.5~2.0%. The time period during which moist rice is subjected directly to the hot drying air should be limited to



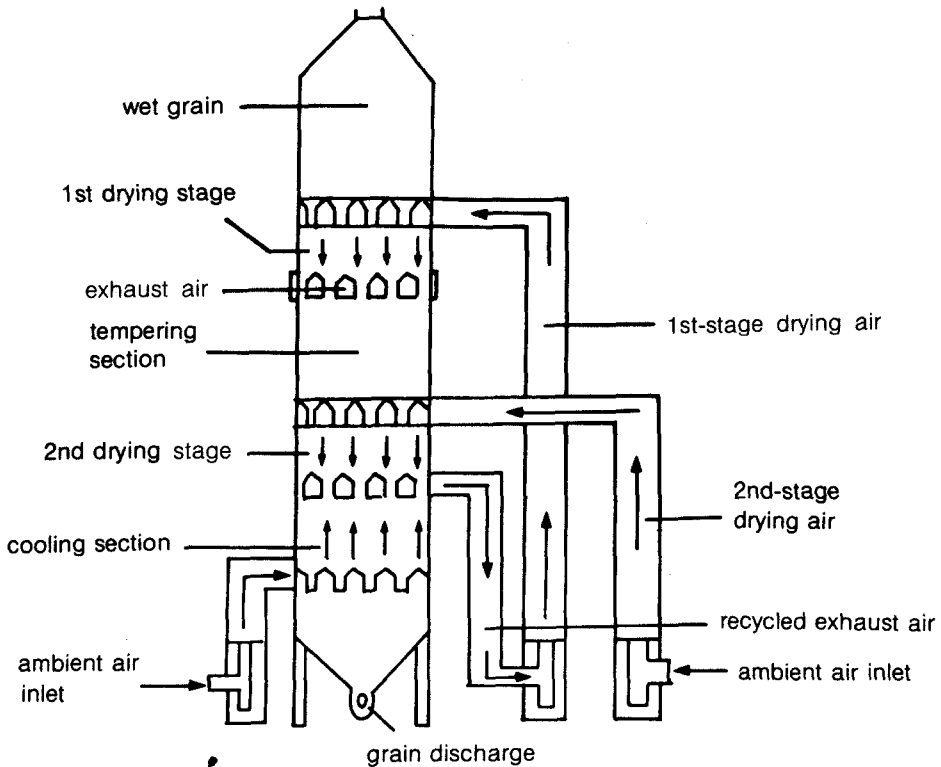


Fig. 10. Two-stage concurrent-flow rice dryer with air recirculation.

15~20 s, and the rice temperature in the tempering zones should not exceed 43 °C. These requirements are met in a three-stage CCF dryer operating at air temperatures of 150~175°C, 100~150°C, and 75~125°C, respectively, in the first, second, and third stages, and at a grain velocity of 5~7 m/hr. The tempering time between drying stages at this grain velocity is approximately 1 hour, which is sufficient due to the uniformity of the kernel temperature and moisture content of the rice entering the tempering zone. Table 12 shows experimental data for the drying of 23.5% moisture content medium-grain rice to 13.5% in a three-stage CCF dryer. Two passes are required; in the first pass 5.4% of the moisture is removed, in the second pass 4.6%. The drying-air temperature in each stage is higher during the first pass than during the second because more water is evaporated from the rice during the first pass through the dryer. Notwithstanding the use of very high drying-air temperatures, the head yield decreased by only 1.3%.

In general, the number of passes to dry rice in a three-stage concurrent-flow dryer is one-third of that required in either a crossflow or mixed-flow dryer, assuming the resulting grain quality is comparable.

Table 12. Dryer settings for a three-stage *concurrent-flow* dryer with *medium-grain* rice using a double-pass system.

DRYING PASS	FIRST	SECOND
Initial moisture content (% w.b.)	23.5	18.1
Grain velocity (m/hr)	4.0	4.7
	FIRST STAGE	
Inlet air temperature (°C)	150.0	130.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	40.0	35.0
Outlet moisture content (% w.b.)	21.7	16.6
Maximum rice temperature (°C)	54.0	59.0
Outlet rice temperature (°C)	38.0	44.0
	SECOND STAGE	
Inlet air temperature (°C)	130.0	110.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	35.0	35.0
Outlet moisture content (% w.b.)	19.6	15.2
Maximum rice temperature (°C)	60.0	59.0
Outlet rice temperature (°C)	41.0	43.0
	THIRD STAGE	
Inlet air temperature (°C)	100.0	100.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	35.0	35.0
Outlet moisture content (% w.b.)	18.1	14.0
Maximum rice temperature (°C)	55.0	56.0
Outlet rice temperature (°C)	39.0	42.0
	COOLING STAGE	
Inlet air temperature (°C)	—	20.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	—	20.0
Final moisture content (% w.b.)	18.1	13.5
Dryer energy efficiency (kJ/kg)	4,453	4,158

Source : Brooker et al. (1992).

## V. Storage Management

The objective of proper rice-storage management is to maintain, throughout the storage period, the characteristics that the rice possesses immediately following harvesting and drying. The principal sources of the loss in quality and quantity of rice during storage are molds, insects, mites and rodents. Respiration may contribute to a loss in dry matter; the losses due to respiration

are usually minor compared to those caused by living organisms.

In the U. S. A., rice is stored in concrete silos and in metal bins. Concrete silos are expensive but rice near the silo walls is not affected as much by changes in the ambient temperature than is the case in metal bins. However, proper aeration is able to minimize non-uniformity in the rice temperature in metal bins.

In the United States, rice on farms is usually stored in round flat-bottomed corrugated steel bins with a diameter of 5.54 m to 11.0 m; at a grain depth of 5.5 m, their holding capacity is between 75 MMT and 300 MMT of rough rice. The bins are filled with inclined screw conveyors, belt conveyors and bucket conveyors, and are provided with fully perforated floors or with air ducts for drying and/or aeration. Grain spreaders are often employed to prevent fines from collecting under the loading spout. Before the rice is loaded into a bin, it is cleaned. The unloading of a bin requires a sweep auger and an underfloor auger.

Rough rice in the U. S. A. is sorted for periods varying from a few weeks to several years. Regardless of the length of storage, grain pests can invade the stored rice. The degree of pest activity is mainly affected by (1) the rice moisture content, (2) the rice temperature, (3) the foreign-material level in the grain mass, and (4) the rice hybrid.

The rice moisture content and temperature can be controlled by practicing the proper drying and aeration techniques, the foreign material by adequate grain cleaning. The engineer usually has no control over the choice of the rice hybrid.

## **1. Ambient-Air Aeration**

The main objective of aeration is to maintain rice stored at 12~14% moisture content to within 3~6°C of ambient. The process of aeration consists of blowing ambient air through the grain mass at an airflow rate of 0.01~0.10 m<sup>3</sup>/min-tonne. An aeration controller decides if, when, and for how long blowing is needed.

The most sophisticated programmable aeration controllers used in the U. S. A. measure the temperature and relative humidity of the ambient air and the temperature and equilibrium relative humidity of the rice. Two probe locations are employed: (1) at the entrance to the fan, and (2) at that location in the bin in which the rice is most likely to heat up and spoil (i.e. the area with the least airflow, in the center of the bin about 30 cm under the grain surface). The controller can be programmed for the rice temperature and the moisture content to be maintained. With this information, the microprocessor of the controller calculates the target equilibrium relative humidity to be kept in the

interstices of the rice mass.

Less sophisticated aeration controllers base their decisions solely on the air and rice temperatures. Their advantage is that they are not affected by the drift of a sensor, as is invariably the case with aeration controllers that require the relative humidity of the air as an input parameter.

Operation of the aeration fans is controlled by the control strategy programmed into the software of the microprocessor of a controller. There are several levels of complexity used in commercial aeration controllers. Two levels are illustrated by the following examples:

1) Operation of the fan.

- a. If the relative humidity of the ambient air is below 65%.
- b. If the air temperature is 8°C below the rice temperature.
- c. If the electricity rate is a minimum.

2) Operation of the fan according to certain rules.

- a. The fan is run continuously as long as the maximum rice temperature is at least 8.0°C above a preselected rice temperature [e.g. 7°C], and if the ambient relative humidity is below 90% and the ambient temperature is at least 3°C below the average rice temperature.
- b. The daily fan operation period is limited; it depends on the difference between the measured average rice temperature and a preselected temperature, and on the difference between the measured (and calculated) rice equilibrium moisture content and the target rice moisture content.
- c. A running account is kept of the backlog hours if the weather conditions do not allow operation of the fan during long periods; as the backlog increases, the temperature-humidity range under which fan operation is acceptable is automatically widened.

Many aeration systems in the U. S. A. are still controlled manually or, at most, with a humidistat. The automatic controllers discussed constitute a substantial improvement over manual-humidistat control in terms of improved mold and insect control, less overdrying, and 10~20% less electrical consumption because of decreased fan operation.

## 2. Chilled Aeration

Aeration with ambient air permits the cooling of a bin/silo of rice to within several degrees of the minimum ambient temperature. In some rice-growing areas of the U. S. A., stored rice cannot be cooled immediately to 10 to 15°C by aeration with ambient air. Chilled aeration is able to do so, and therefore is now used at some rice-processing facilities in the U. S. A.

Chilled aeration is defined as the cooling of a lot of grain to below the ambient temperature. A grain chiller is employed in the chilled-aeration process. In a grain chiller, ambient air is ducted first over a bank of refrigerated coils to decrease the temperature, and subsequently over an electric heater to reheat the chilled air a few degrees in order to reduce the relative humidity from 100% to 60~75%. Thus, the temperature and relative humidity of the air in a grain chiller are set by the operator. Once the rice has been initially cooled to 10~15°C, only occasional rechilling for short periods of time is required to maintain the optimum storage conditions.

Fig. 11 is an example of the use of chilled aeration in cooling 175 MMT of milled rice in a concrete silo from 26~29°C to 11~12°C within 48 hours (Maier, 1994). The airflow rate was about 0.6 m<sup>3</sup>/min. tonne. The grain chiller controlled the temperature to  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  and  $\pm 2\%$  of the setpoints.

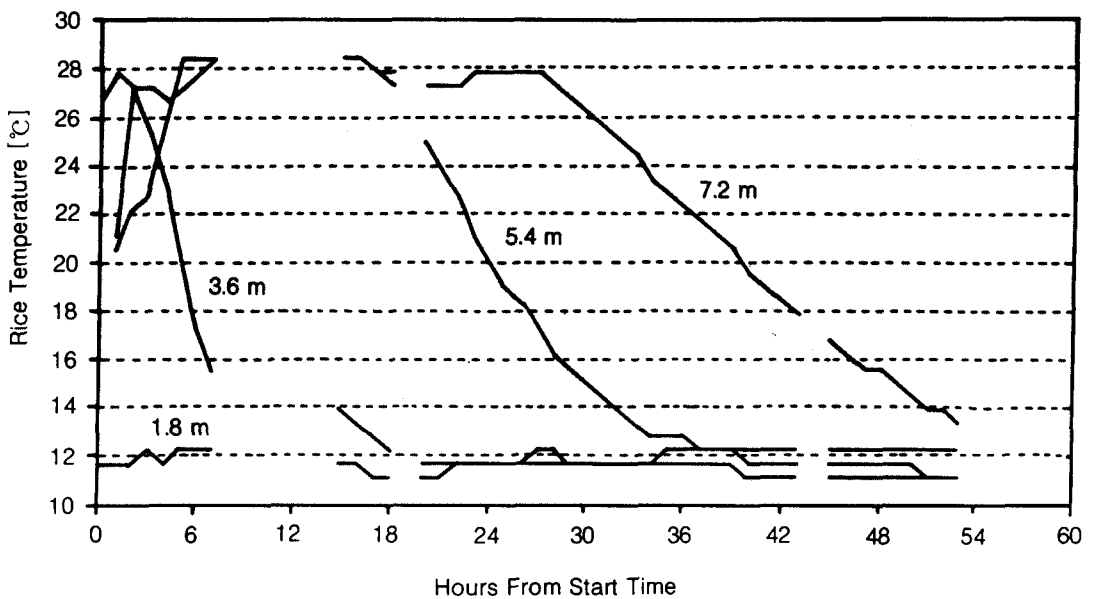


Fig. 11. Temperatures of milled rice conditioned with the Chilled Air Aeration and Conditioning System (AAG Manufacturing, Milwaukee, Wisconsin, U. S. A.) operating at a commercial rice processing facility in California in 1993.

## VI. Auxiliary Factors

Physical, biological, economic and human factors affect the performance of rice drying/storage systems. Each can have a significant impact on throughput, energy efficiency and grain quality of a system, and therefore are

considered in the U. S. A. in the engineering evaluation.

The climate determines the type of hybrid that can be grown in a particular region, the expected moisture content range, and the weather at harvest. The initial grain moisture content and rice temperature have a significant effect on dryer performance. Not only are dryer throughput, energy consumption and rice quality influenced by the initial moisture content/temperature, but also the operating costs. When rice is harvested about or below its optimum harvest moisture, the quality losses during drying increase. Thus, in regions where the harvest moistures frequently exceed the optimum value, rice quality is negatively affected.

In certain years, rice reaches the dryers at excessively high moistures due to wet weather. This leads to lower dryer capacity, higher energy consumption, and decreased rice quality. Weather conditions have a direct effect on the performance of in-bin natural-air and low-temperature dryers. These low-capacity systems may not be able to dry wet rice before molding sets in. Continuous-flow high-temperature systems are less directly affected by weather conditions.

Economics can affect dryer costs by influencing fuel prices and availability. The relative prices of natural gas, fuel oil, liquid propane, coal and electricity vary from year to year. At the present time, natural gas is the least expensive and electricity the most expensive energy source in the United States. The type of fuel affects dryer operation because it influences burner efficiency and drying-air quality.

Rice drying is a complicated heat/mass/momentum transfer process of a heat-sensitive biological product, and is not well understood by the average dryer operator. At many U. S. commercial handling facilities, the dryer operator job is seasonal: it requires 12-hour days, 7 days a week, for only 2 to 3 months. The job training is usually by trial and error. Therefore, it is not surprising that dryer operation is far from optimal. Proper operation affects the performance of the typical dryer with respect to capacity, energy efficiency, and rice quality. The most frequent mistake is using excessively high temperatures in order to increase dryer capacity.

Moisture meters are an integral part of the rice drying/storage system. Electronic meters are used at all U. S. rice handling facilities. Meters have an accuracy of  $\pm 1$  percent at the 13 to 20 percent moisture range, and only  $\pm 2.5$  percent at higher moistures. This contributes substantially to overdrying or underdrying of rice.

Air temperature measurement in a rice dryer is frequently accomplished in the U. S. A. by a single thermocouple or thermistor, an acceptable practice when the temperature distribution in the dryer plenum is uniform. However, in

many off-farm dryers and on-farm models, temperature differences of 20 to 35°C in the plenum are not uncommon, resulting in overheating of part of the grain column and deterioration of the average rice quality. Therefore, multiple temperature measurement is now practiced at U. S. drying installations.

The cleaning of rice prior to drying is not a common practice (yet) in the U. S. A. Cleaned rice results in a more uniform airflow in the dryer and in the storage bin, and thus in a more uniform moisture content of the rice. Also, cleaning leads to a decrease in the static pressure, and thus in an increase in the airflow in the dryer and during aeration. Finally, cleaning grain before it enters the dryer decreases the air pollution, an ever more important consideration in the application of technology in the U. S. A.

## VI. References

- Bakker-Arkema, F. W. and R. Hines. 1993. A new in-bin rice-drying system for China. Paper No. 16, presented at the 1993. International Symposium on Grain Drying and Storing Technology. Beijing, China, September 15-18, 1993.
- Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall. 1992. *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
- Chau, N. N. and O. R. Kunze. 1982. Moisture content variation among harvested rice grains. Trans. ASAE 25(4):1037-1040.
- Maier, D. E. 1994. Chilled aeration and storage of U. S. crops. Paper presented at the 6th International Conference on Stored-Product Protection, Canberra, Australia, April 17-23, 1994.
- MWPS. 1989. Planning grain-feed handling for livestock and cash-grain farms. Midwest Plan Service Bulletin No. 13, Iowa State University, Ames, IA.
- Siebenmorgen, T. and J. Langston. 1991. Rice drying on the farm. MP 283. Cooperative Extension Service, University of Arkansas, Fayetteville, AR.
- USDA. 1993. Rice-situation and outlook report. RCS-68. United States Department of Agriculture, Washington, D. C.
- World Grain. 1993. and 1994. Sosland Publishing Company, Kansas City, MO.

## 미국에서의 벼 건조 및 저장현황 (The Present Status of Rice Drying and Storage in the U.S.A.)

**Fred W. Bakker-Arkema and R. Hines**

미시간주립대 농공학과, MFS /York, Inc.

### I. 서 론

미국은 세계적으로 주요 곡물생산국 중의 하나이다. 19세기 초에 세가지 주요 곡물 - 옥수수, 쌀, 밀 - 의 세계 생산량은 13~14억 톤(metric tons)으로 안정되었고, 같은 기간동안 콩 생산량은 1.1~1.2억 톤이었다. 표 1에서 보는 바와 같이 미국은 옥수수, 콩, 밀의 주요 생산국이지만 쌀의 주 생산국은 아니다.

쌀의 세계적 생산량, 무역량, 시장가격, 비축량 등의 최근 3~5년간 자료가 표 2에서 표 7까지 나타나 있다. 한국과 미국은 비슷한 양의 벼를 생산하고 있으며, 중국이 지금까지 최대 생산국이었다 (표 2). 미국에서는 장립미가 주종을 이루고 있다 (표 3). 주요 쌀 수출국은 미국과 태국 두 나라이다 (표 4). 현재 미국은 쌀을 백미 또는 parboiled 형태로 수출하고 있다 (표 5). 최근 1년간을 제외하고 세계 쌀의 시장가격

Table 1. Production (MMT) of major grain crops in the U.S.A. and the world in 1990-1991.

	U.S.A	WORLD
MAIZE	201	470
RICE	7	518
SOYBEANS	52	115
WHEAT	79	592

Source : USDA (1993).

Table 2. Rice production (MMT) in different countries.

	KOREA	JAPAN	U.S.A	CHINA
1988 /89	8.4	12.4	7.3	169.1
1990 /91	7.7	13.1	7.1	189.3
1992 /93	7.3	13.2	8.1	186.2
1993 /94	6.4	10.3	7.5	177.1

Source: World Grain (1994).



은 지난 5년간 거의 변하지 않았다 (표 6). 같은 기간 동안 세계 쌀 비축량은 일정하게 감소하는 추세를 보이고 있다 (표 7).

Table 3. U.S. production (MMT) of long and medium/short rice.

1988 /89	5.3	1.8
1990 /91	4.8	2.1
1992 /93	5.7	2.7
1993 /94	5.2	2.2

Source : *World Grain* (1994).

Table 4. Rice exports (MMT) of the U.S.A and Thailand.

	U.S.A	THAILAND
1988	2.2	4.8
1990	2.4	3.9
1992	2.1	4.8
1993	2.5	4.3

Source : *World Grain* (1994).

Table 5. The type of U.S. rice exports (MMT).

	ROUGH	MILLED	BROWN	PARBOILED
1988 /89	0.1	1.4	0.3	0.8
1990 /91	0.2	0.8	0.4	0.8
1991 /92	0.2	0.7	0.3	0.8

Source : USDA (1993).

Table 6. The world-market prices (\$/MMT) of different types of rice.

	LONG	MEDIUM	SHORT	BROKEN
12 /88	210	194	192	105
12 /90	182	161	160	91
12 /92	190	172	171	95

Source : USDA (1993).

Table 7. World rice stocks (MMT).

1988	47.8
1990	59.5
1992	52.4
1993	44.9

Source : *World Grain* (1994).

미국에서 수확되는 쌀의 평균함수율은 쌀의 종류, 수확시기, 재배지에 따라 16~28% 범위이다. 캘리포니아의 중립미, 단립미는 함수율 20~26%에서 보통 수확하고, 2차 수확시의 텍사스 장립미는 16~18%에서 수확한다. 일반적으로, 수확시 함수율이 높으면 생산량과 완전미수율이 (head yield) 최대이다.

건조과정에서는 상당량의 수분이 곡물로부터 제거되어야 한다. 함수율 25%에서 15%로 100kg 상당의 물을 건조하는데 125,000kcal 이상의 에너지가 필요하다. 미국에서는 천연가스와 액화석유가스가 주요 에너지원이고, 기름과 석유는 이따금 사용되는 실정이다.

쌀 건조시 주의할 점은 같은 재배구역 내의 함수율이 균일하지 않다는 점이다. 같은 포기 안에서도 수확시 가장 잘 익은 낱알과 가장 덜 익은 낱알 사이에는 함수율 차이가 있다. 가장 잘 성숙한 꼭대기부분 낱알과 가장 덜 성숙한 아랫부분 낱알 사이의 함수율의 차이는 20%까지 나타난다. 한 지역안에서 함수율이 과도하게 높은 벼의 비율은 매우 낮다. 표 8은 방금 수확한 텍사스 장립미에서 크기가 서로 다른 다섯가지 낱알에 대한 함수율분포를 보여준다. 평균함수율은 19.8%이고, 함수율 20.1% 이상인 낱알은 전체의 21.5%로서 대부분 작은 낱알의 부류에 속한다.

Table 8. Moisture content distribution of five fractions in a freshly harvested sample of *long-grain* rice at an average moisture content of 19.8% (w.b.).

SCREEN SIZE (mm)	AMOUNT RETAINED (%)	MOISTURE CONTENT (% w.b.)
1.98 × 12.70	78.5	19.2
1.93 × 19.05	7.0	20.1
1.78 × 12.70	10.0	21.2
1.63 × 9.53	3.6	23.1
1.55 × 12.70	0.9	27.1

Source : Chau and Kunze (1982).

미국내 어떤 재배지역에서는, 개인이 가져온 쌀의 경우 그 개인의 고유번호를 명시한 다음 각각 다른 빈(bins) 안에서 건조되고 저장된다. 텍사스 장립미에 이런 방식이 적용되었다. 일반적으로 같은 재배구역내의 쌀은 함수율이 상당히 균일하기 때문에 개인의 고유번호를 명시하여 건조하는 방식이 용이하다. 캘리포니아에서는 반대로 다양한 재배자들로 부터 들여온 쌀을 건조, 저장하기 전에 혼합하여 창고에 둔다. 여러 재배구역에서 들여온 혼합미의 평균 함수율의 차이는 8~10%까지 크다. 혼합미 건조는 부분적인 과잉 건조와 완전미수율의 감소를 초래한다.

## II. 미 질

쌀 건조 중에 유지되어야 할 미질 특성은 완전미수율, 색깔, 밥맛 등이다. 완전미수

율은 특별히 건조방식에 따라 달라서, 이것을 보통 미국에서 건조시스템의 성패여부를 평가하는데 쓰인다. [주: 완전미수율의 정의는 같은 재배구역내에서 생산된 벼에 대한 완전미 생산량의 백분율을 말한다.]

완전미수율은 품종, 수확시의 평균습수율, 기후조건에 따라 달라진다. 캘리포니아에서는 1979년에서 1985년까지 7년간, 중립미의 평균완전미수율은, 조기수확품종 52.0%, 중간수확품종 53.8%, 후기수확품종 57.4%이었다. 중립미 습수율은 21~23%에서, 장립미는 18~20%에서 완전미수율이 최대이었다. 장립미, 중립미, 단립미의 완전미수율이 수확시의 습수율의 함수로 그림 1에 표시되어 있다. 쌀을 32℃ 이상에서 수확했을 경우 완전미수율의 감소를 예상할 수 있다. 텍사스에서는 습수율 20~22% 범위내에서 장립미의 완전미수율이 최대가 되고, 습수율 16~18%일 때 완전미수율은 급격히 감소하고 동시에 껍데기비율은 현저하게 증가한다.

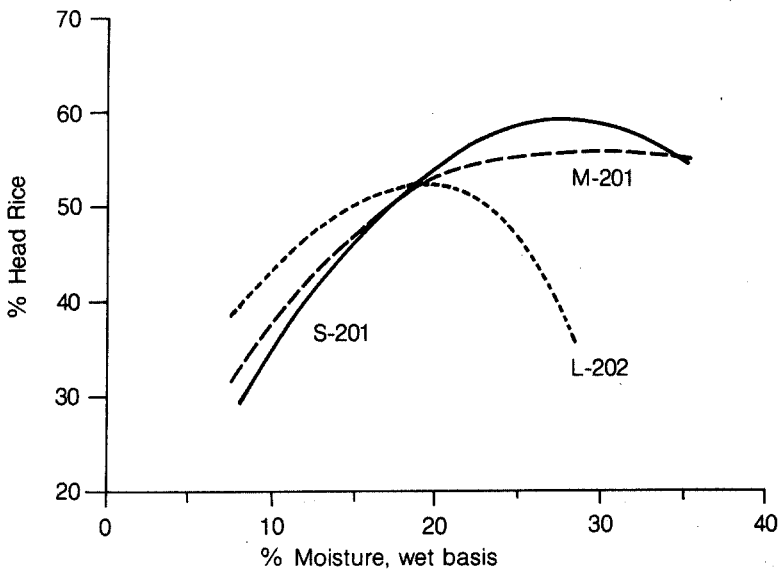


Fig. 1. Head yields of the *long-grain* variety L-202 compared with the *short-grain* variety S-201 and the *medium-grain* variety M-201 when harvested at various moisture contents.

난알 내부의 수분구배(gradient)와, 개별 난알 사이의 습수율 차가 평형이 되도록 건조를 하루 지연시키면 같은 재배구역 내 완전미수율이 증가한다. 약 1%의 완전미수율의 증가를 기대할 수 있으나, 하루 이상 지연시킨 후에 건조처리한다고 해서 반드시 완전미수율에 영향을 미치는 것은 아니다.

쌀 건조의 목적은 완전미수율의 손실과 에너지 소비를 최소화하고 쌀의 색깔, 맛에 영향을 미치는 일 없이 건조기의 건조용량을 최대화하는데 있다. 쌀을 13.5%까지 건조하는데, 온도 25~35℃와 상대습도 55~65%에서 10~20분간 서서히 계속 건조하고 4~6시간 간헐적으로 템퍼링시킴으로써 완전미의 손실을 최소화 할 수 있다. 이 때문에 이와같은 조합건조 방식은 건조기의 완전미수율을 평가하는데 사용된다.

미국내 상업용 건조에서, 생산량은 변하지 않는 반면 완전미수율은 1 내지 4 퍼센트 포인트 감소를 예상할 수 있다. 예를 들면, 1983~84년도에 다회통과 횡류건조 방식을 사용한 캘리포니아에서 완전미수율은 2.6% 내지 4.3% 감소하였고, 생산량은 +1.8%에서부터 -2.3%까지 변한 것으로 나타났다.

완전미와 쌀미 간의 가격차는 연도, 쌀미의 크기, 국가에 따라 다르다. 1980년대 미국에서 쌀미가격은 완전미의 57~63%이었다. 그래서, 수확에서부터 안전저장함수율까지 건조할 때 완전미 손실을 최소화하는 것은 건조기 설계자와 운전자에게 있어 당연한 일이다. 완전미수율 2, 3 퍼센트 감소는 쌀 건조시스템을 위한 실제 설계 목표가 될 수 있다.

### Ⅲ. 빈 건조기

미국에서 사용되는 빈건조기 시스템은 (1) 풀빈상온통풍저온건조식 (full-bin natural air and low-temperature drying), (2) 층건조식 (layer drying) (3) 인빈역류건조식 (in-bin counterflow drying) (4) 인빈배치건조식 (in-bin batch drying)이 있다.

#### 1. 풀빈건조식

인빈상온통풍식과 인빈저온식 건조기는 설계에 있어서 유사하다. 두 가지 방식 모두 풀빈건조기로서 빈 안에 곡물을 2.5에서 5.0 m 깊이로 쌓고 외부에 팬을 설치하여 서서히 건조시킨다 (그림 3). 상온통풍건조기는 바깥공기를 사용하고, 저온건조기는 약간 가열된 공기를 ( $\Delta T = 3 \sim 5^\circ C$ ) 사용한다. 두 시스템 모두 적절히 운전된다면 비교적 낮은 곡물처리량을 양질로 건조할 수 있다. 퇴적된 곡물로 들어가는 공기의 송풍량과 상대습도는 두 시스템의 성공을 좌우한다. 요구되는 최소송풍량과 상대습도는 초기함수율, 수확일, 건조과정의 환경조건, 장소에 따라 달라진다. 아칸사 장립미의 인빈상온통풍식 건조에 대한 최소송풍량이 표 9에 나타나 있으며, 송풍량 선택에 관한 초기함수율의 중요성을 예시하고 있다. 표 9를 검토할 때, 해당지역에 따른 값을 이해해야 하고, 다른 쌀 재배지역에 적용해서는 안된다 (예, 캘리포니아, 한국).

Table 9. Recommended airflow for the in-bin natural-air drying of *long-grain* rice in Arkansas.

MC INITIAL (% w.b.)	AIRFLOW (m <sup>3</sup> /min. tonne)	MC INITIAL (% w.b.)	AIRFLOW (m <sup>3</sup> /min. tonne)
15 ~ 18	2	20 ~ 22	4
18 ~ 20	3	above 22	6

Source : Siebenmorgen et al. (1991).

교반기는 (stirring devices) 인빈상온통풍식 및 저온식 건조기와 함께 자주 쓰인다. 매 24시간 내지 48시간마다 빈내용물을 혼합하기 위해 작동한다. 교반작업은 빈내 바닥층의 과건조 문제를 덜어주고, 쌀을 통과하는 송풍량을 10% 가량 증가시키며, 빈내 급격한 수분구배가 생기는 것을 방지해 준다. 빈벽의 다공라이너는 수분응고를 막고, 벽을 튼튼히 해 준다.

인빈층건조 방식은 상온통풍식과 유사하며 비슷한 송풍량을 갖고 있다. 쌀을 한꺼번에 채우는 것이 아니라, 앞의 건조층이 거의 원하는 함수율에 다달았을 때 다음 건조층을 연속적으로 채우도록 한다 (그림 2). 상온통풍과 저온건조식과 같이, 층건조식은 소량의 곡물처리 시스템이다. 최적운전조건은 지역, 작물형, 작물조건에 따라 다르고, 상당한 수준의 전문운전자가 필요하다.

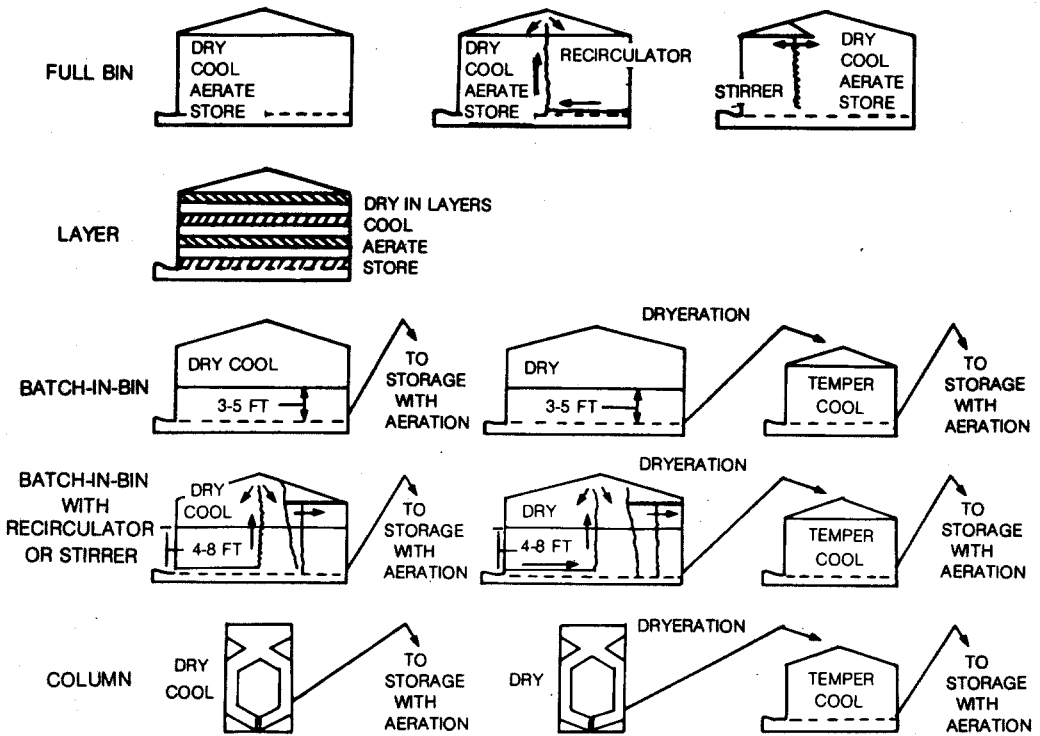


Fig. 2. On-farm in-bin and non-bin grain drying systems (Brooker et al., 1992).

인빈역류건조식은 비교적 새로운 방식이다. 빈 1개의 곡물재순환 시스템으로 설계할 수 있으나, 보통 두개 이상 빈으로 구성되어 있다 (그림 4). 역류건조빈에 건조되지 않은 습한 곡물이 위에서 반입되고, 빈 바닥에 장착되어 있는 경사진 오거 tapered-auger)로 얇은 층의 곡물을 간헐적으로 빼낸다. 부분적으로 건조된 뜨거운 쌀을 마지막으로 서서히 건조, 냉각시키기 위해 두번째 빈으로 옮긴다. 인빈역류건조 시스템에서 송풍량과 유입공기온도는 상온통풍식과 저온식 건조기보다 높다. 이것은 역류 시스템에서 곡물이 제한된 시간 동안만 (일수, 시간이 아닌 분 단위) 따뜻한 공기를

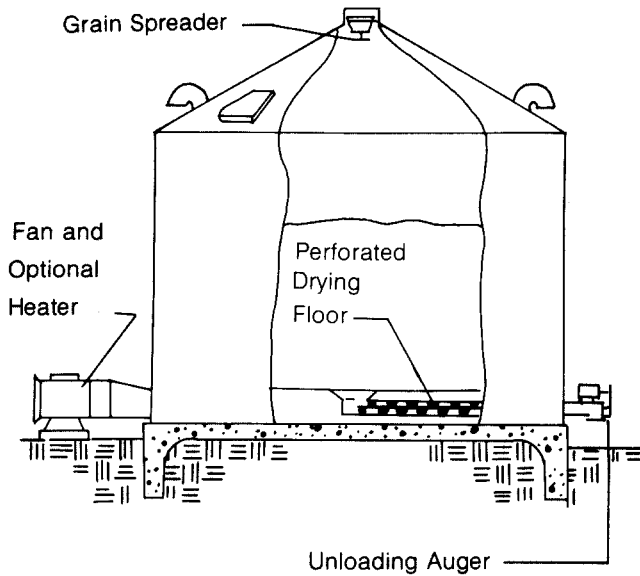


Fig. 3. In-bin natural-air /low-temperature rice dryer (MWPS, 1989).

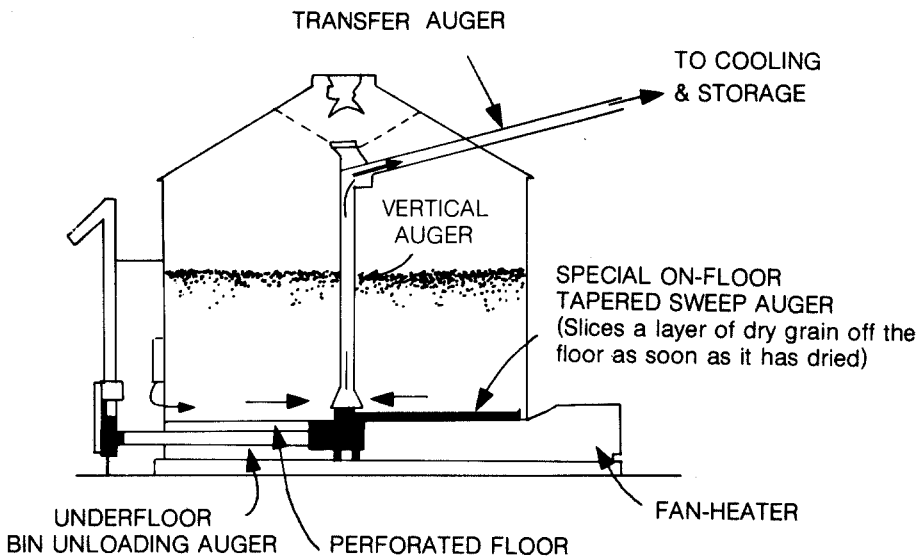


Fig. 4. In-bin counterflow grain dryer.

받기 때문이다.

인빈배치식 건조기는 한정된 두께의 (0.3~1 m) 배치 안의 곡물을 비교적 높은 송풍량과 높은 온도조건하에서 건조한다. 건조과정에서 벼는 다공철판이나 (그림 2) 빈꼭대기에 놓여진 건조대 위에 (그림 5) 놓아도 좋다. 인빈배치식 건조기의 유입공기의 송풍량과 온도는 인빈역류건조기와 비슷한  $5\sim 10\text{ m}^2/\text{min}$ 톤과  $35\sim 45^\circ\text{C}$ 이다.

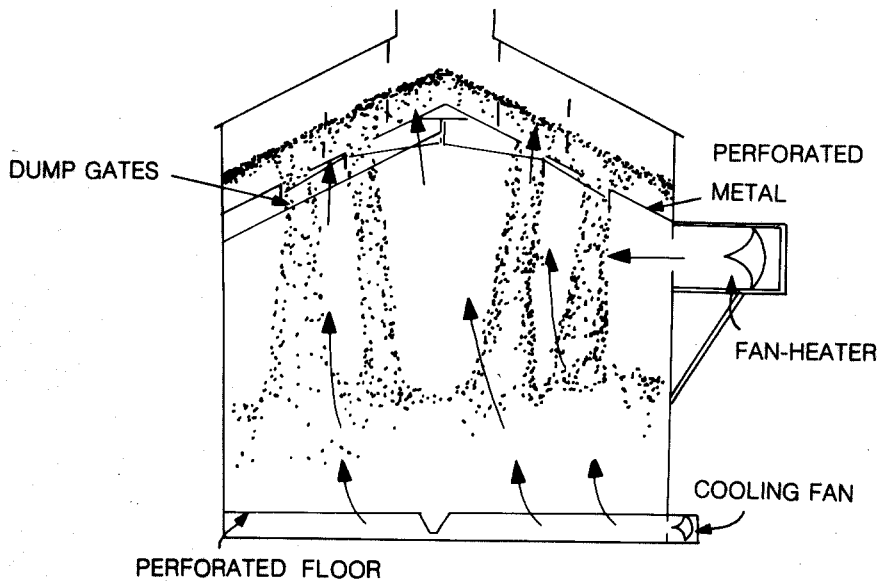


Fig. 5. Top-bin rice drying system.

Table 10. Approximate operating conditions of the TB/IBCF drying system in drying long-grain rice from 24% to 13% (w.b.).

AIR/GRAIN CONDITION	BIN 1		BIN 2		BIN 3	
	TB	IBCF	TB	IBCF	TB	IBCF
AIR TEMP (°C)	52	27	46	27	41	27
AIRFLOW (m <sup>3</sup> /min, tonne)	50	1	50	1	50	1
OUTLET MC (AVERAGE, %)	20	19	16	15	13.5	13
OUTLET TEMP (AVERAGE, °C)	41	27	39	28	37	28

Source : Bakker-Arkema and Hines (1993).

최근의 인빈건조 설계는 소위 상부빈 및 인빈역류 (top-bin /in-bin-counterflow) 시스템으로 불리는데 상부빈 건조방식과 인빈역류 및 인빈상온통풍 건조방식을 결합한 식이다. 그림 6은 이 시스템 개략도를 (layout) 보여주고 있다. 이 시스템은 한 개의 호퍼형 하수빈, 상위빈 단속류식 및 인빈연속식 건조빈 셋, 인빈통풍 및 저장용 빈들이 직렬로 배치되어 있다. 각각의 빈상부에 상위빈 건조기가 (top-bin, TB), 빈하부에 인빈역류 건조기가 (in-bin counterflow, IBCF) 있다. 그래서, 건조, 통풍 과정에서 높은 함수율의 쌀이 여섯 단계의 건조와 한번의 통풍 처리를 받도록 되어있다.

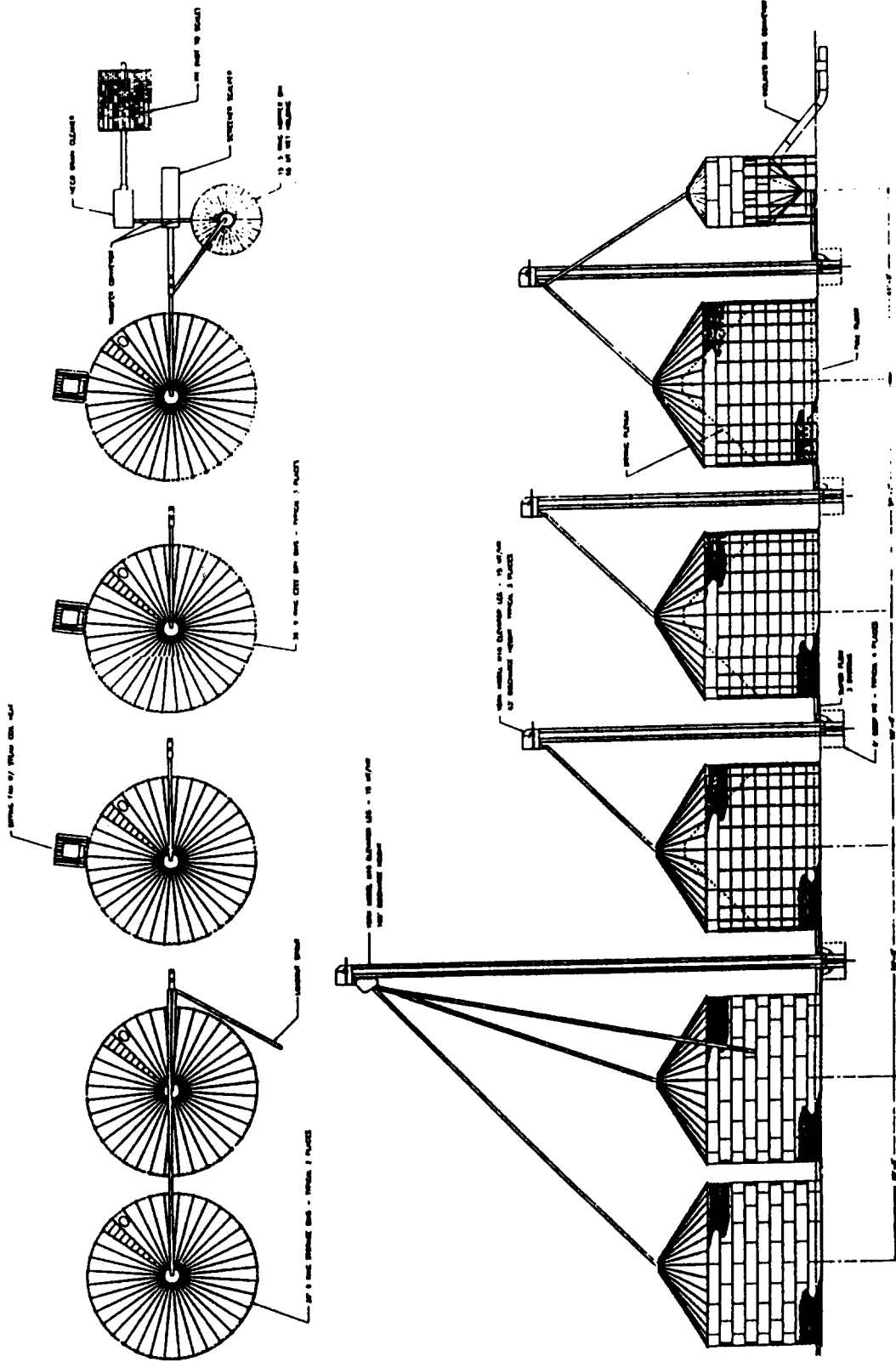


Fig. 6. TB /BCF rice-drying system.



쌀을 24%에서 13%까지 건조하는데 TB/IBCF 시스템의 전형적인 운전조건이 표 10에 나타나 있다. 각각의 건조빈에서 TB 건조기내 곡물 깊이는 0.3 m, IBCF 건조기는 1.5 m이다. TB와 IBCF 건조처리 사이에 템퍼링 시간은 7.5 시간이다. 그래서, TB/IBCF 3번 시스템의 총 건조시간은 수분 약 10 퍼센트 포인트 건조하는데 27 시간 소요된다.

#### IV. 연속식 건조기

미국 미곡건조업계에서는 세가지 연속식 건조시스템이 사용되고 있다.; 횡류식 (crossflow), 혼합식 (mixed-flow), 병류/역류식 (concurrent flow/counter flow) 건조기이다. 각각의 형식이 그림 7에 나타나 있다.

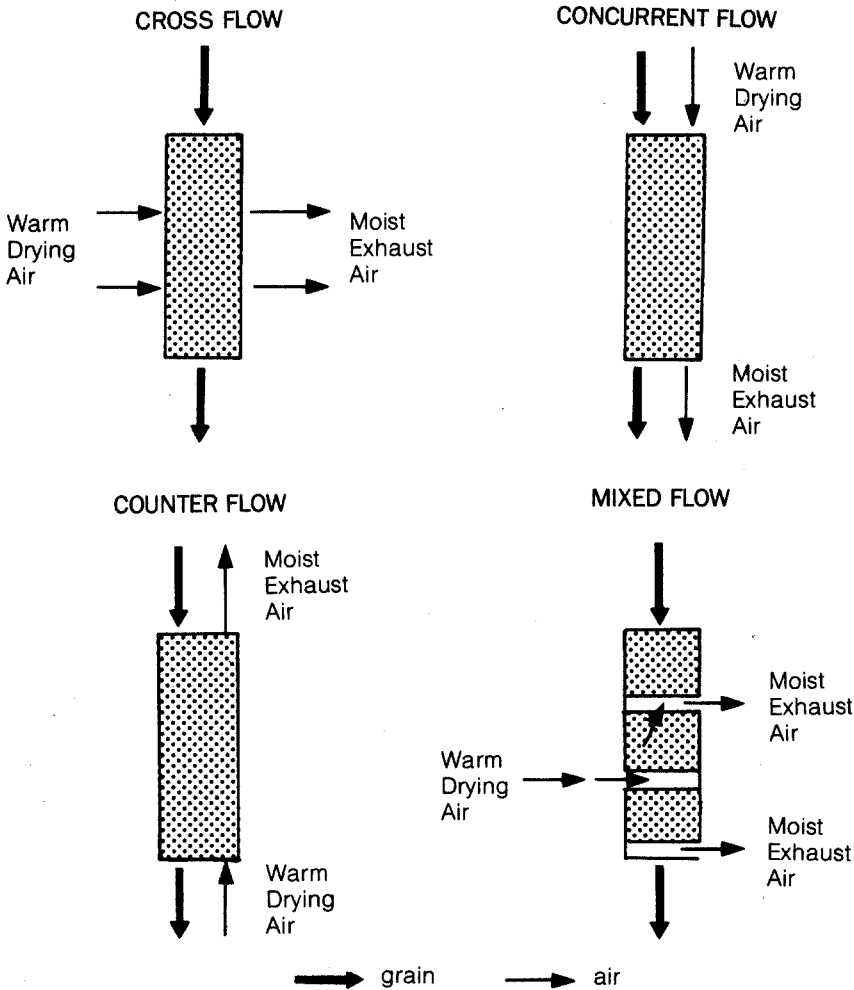


Fig. 7. Schematic of the four continuous-flow rice drying/cooling systems.

높은 완전미수율을 유지하기 위해 연속식 건조기내에서 여러 건조통로를 거쳐 쌀이 건조된다. 건조기를 연속적으로 통과하는 사이의 템퍼링 시간은 1~24 시간인데, 이것은 쌀의 평균온도와 온도분포정도에 좌우된다. 주어진 시간 동안 함수율이 서로 다른 낱알과 함께 국부건조된 쌀을 템퍼링하도록 충분한 숫자의 빈이 있어야 하기 때문에 다회통과식 건조에 관한 기술이론은 복잡하다.

### 1. 횡류식 건조기와 혼합식 건조기

횡류식 벼 건조기의 설계 특징은 낱알과 건조공기의 방향이 서로 수직으로 교차하는데 있다. 이것은 쌀의 불균일 건조를 초래한다. 최근에는 설계기술이 발전되어 미

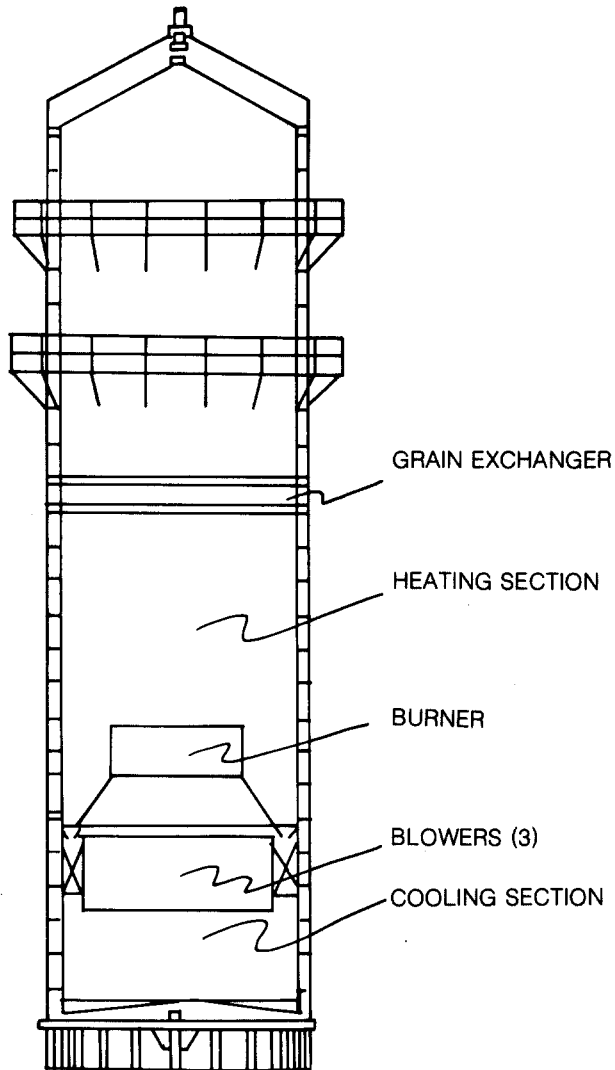


Fig. 8. Crossflow rice dryer with grain exchanger and cooling-air recirculation.

질 특성이 향상되었다. 재래의 횡류식 건조기에서는 빠져나간 공기가 부분적으로만 포화되었을 뿐이다. 재순환 건조공기 일부와 냉각공기 모두가 현저하게 에너지 소비를 감소시킨다. 곡물내의 수분과, 온도 차이를 상쇄시키기 위해 많은 횡류식 건조기 안에다 공기의 재순환식과 함께 공기역류식이 병합되었다. 한개 이상의 인버터를 (inverter) 두면 비슷한 효과를 얻는다. 곡물인버터는 공기입구쪽의 가열된 곡물을 공기출구쪽으로 뒤집어 줌으로써 과잉건조 및 과잉가열을 감소시킨다.

혼합식 건조기에서는 횡류, 병류, 역류 방식이 혼용됨으로써 건조된다. 쌀이 일련의 교차되는 입, 출 공기 도관위로 흘러 꽤 균질한 건조가 이루어지며, 따라서 품질과 함유율이 비교적 균일한 쌀로 건조된다. 쌀을 오랫동안 높은 온도에 둘 수 없으므로 혼합식에서 건조온도는 횡류식보다 높다.

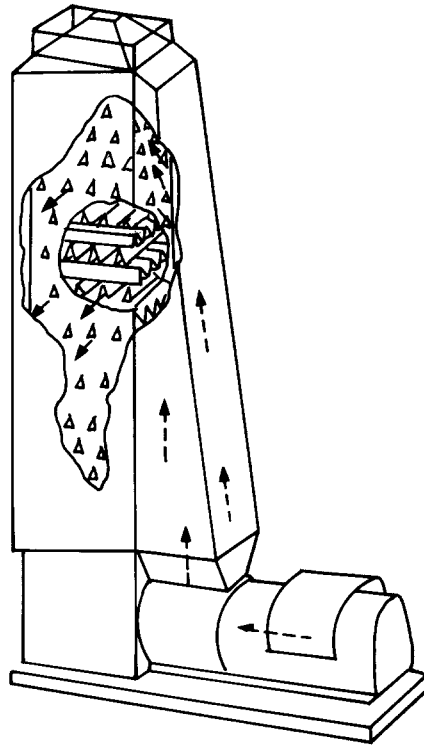


Fig. 9. Mixed-flow rice dryer.

세계적으로, 횡류식 건조기는 (미곡건조업계에서는 주형(column)건조기라 불린다) 미국에서 가장 많이 사용되고, 그외 다른 지역은 혼합식 건조기가 사용된다. 혼합식 (40~45℃) 건조기는 횡류식(35~40℃)보다 약간 높은 온도를 사용한다.

일반적으로, 횡류식이건 혼합식이건 건조기를 1회 통과할 때마다 쌀에서 제거된 수분량은 1.0~2.0 퍼센트 포인트 (w.b.) 이내이어야 한다. 단지 첫번 통과시에만, 조곡이 비교적 차고, 수분량이 높으며, 건조공기가 50~60℃ 되어야 하므로, 수분 제거율이 2.5~3.0 퍼센트 포인트 높다. 건조기내에서 쌀이 머무는 시간은 한번 통과시

20~30분을 초과하면 안되고, 출구에서 낱알 온도가 35℃를 초과하지 말아야 한다. 건조기에서 나오는 낱알의 함수율은 불균일하기 때문에 템퍼링 시간을 보통 6~24 시간 되게 선택한다.

캘리포니아 기후조건하에는 상업용 횡류식 건조기를 사용하여 중립미의 함수율을 24.9%에서 13.6%로 건조하는 예가 표 11에 나타나 있다. 통과 횟수는 8회이었는데, 마지막 통과시 쌀은 외부온도까지 냉각되게 했다. 매 통과시 쌀이 건조기내에 머물러 있는 시간은 21분이었다. 첫번 통과시 58℃ 공기를 사용하는 것을 제외하면, 건조공기온도는 36~40℃ 이고 건조기를 빠져나오는 평균온도는 35℃이었다. 각 통과 사이의 템퍼링 시간은 24시간이었다. 완전미수율이 56~59%에서 55.2%로 감소되었으나 총량은 변하지 않았다.

횡류식과 혼합식에서는 통과 횟수 8회 미만에서 벼가 보통 건조된다. 일반적으로 통과횟수가 증가하면 완전미수율은 증가하는데, 대부분의 건조기 운전자는 비록 함수율이 25%일 지라도 5~6회 이상 통과시키지 않는다. 한번 더 통과시킴으로서 생기는 추가비용과 보다 높게 받을 쌀가격과 비교하여 통과회수를 결정해야 한다.

Table 11. Multi-pass drying of *medium-grain* rice in a commercial *crossflow* dryer.

PASS NO.	AIR TEMPERATURE (°C)	MC (% w.b.)	HEAD YIELD (%)	TOTAL YIELD (%)
0	—	24.9	56.9	68.0
1	58	22.1	—	—
2	40	20.5	—	—
3	38	18.8	—	—
4	38	17.4	56.6	68.2
5	38	16.3	—	—
6	36	15.1	—	—
7	36	14.2	—	—
8	22	13.6	55.2	68.0

Source : Unpublished data of tests by the author.

## 2. 병류식 (Concurrent/Counterflow) 건조기

병류식 건조기는 1개 이상의 병류부와 1개의 역류 냉방부를 갖고 있다. 병류 건조부에서는 곡물과 건조공기의 흐름이 같은 방향이며, 역류 냉방부에서는 반대 방향이다. 소형의 1단계 농가용 병류식 모형을 제외하고, 대부분의 병류식 건조기는 두 개 또는 세 개의 병류 건조대역 (zone)을 갖고 있으며 템퍼링대역은 건조부 사이사이에 위치해 있다. 그림 10은 역류 냉방부가 있는 2단계 병류식 건조기의 개략도인데, 템퍼링부가 두 개의 건조부 사이에 위치해 있다.

병류식 건조기의 가장 큰 특징으로는 건조 과정의 균일성을 들 수 있다. 횡류식이나 혼합식 건조기와 달리, 모든 곡물에는 똑같이 가열, 건조, 템퍼링과 냉각 과정이 진

행된다. 건조공기의 온도 또한 다른 건조기에 비하여 매우 높은 편인데, 이것은 젖은 벼가 횡류식 건조기의 경우는 수시간, 혼합식 건조기에서는 수분동안 뜨거운 건조공기에 노출되는 반면 병류식 건조기에서는 단 수초 동안만 노출되기 때문이다. 그래서 다른 건조기에서 벼의 온도가 건조공기의 온도에 이르는 것에 반하여, 병류식 건조기는 건조공기의 온도와 평형상태가 되지 않는다.

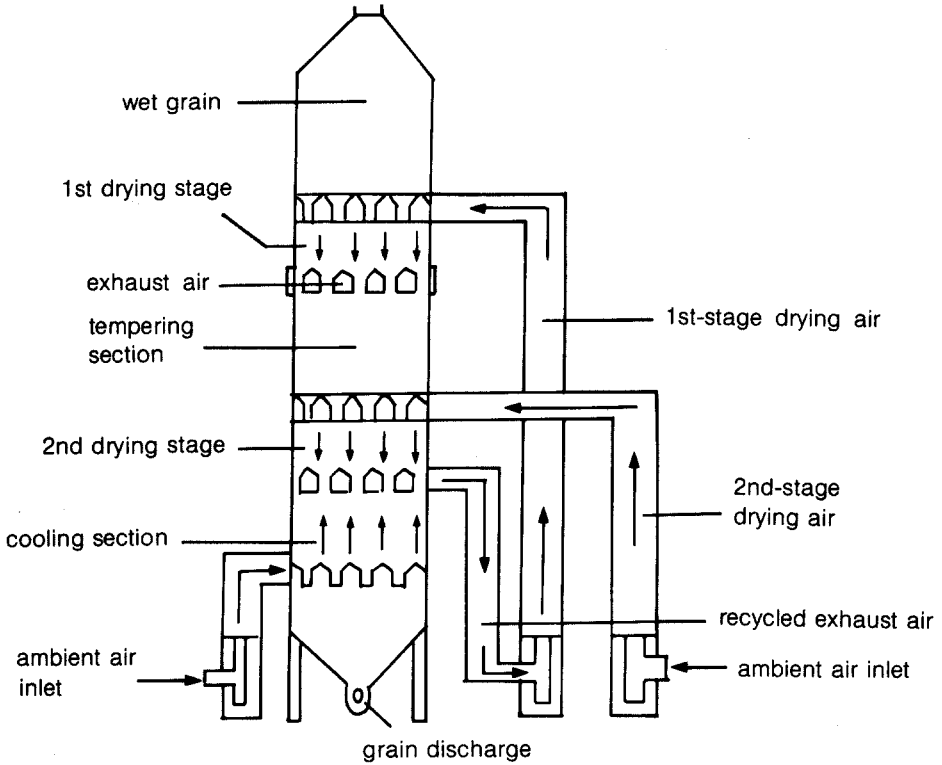


Fig. 10. Two-stage concurrent-flow rice dryer with air recirculation.

병류식 건조기에서 상대적으로 완만한 건조나 냉각 과정, 그리고 내장된 템퍼링 처리 기능은 결과적으로 매우 우수한 질의 건조된 벼를 생산할 수 있게 한다. 병류식 건조기에서는 건조된 벼의 완전미수율은 일반적으로 횡류식이나 혼합식 건조기 보다 높다.

병류식 건조기에서 건조공기의 온도는 65~175℃로서 횡류식이나 혼합식 건조기에 비하여 매우 높다. 벼의 품질을 유지하기 위해서는 하나의 병류건조단계에서 증발되는 최대수분량은 1.5~2.0%를 초과해서는 안된다. 습한 벼가 직접적으로 뜨거운 건조공기에 노출되는 시간은 15~20초로 제한하여야 하며, 템퍼링 대역에서 벼의 온도가 43℃를 초과해서는 안된다. 이러한 요구조건들은 3단계 병류식건조기를 사용하였을 때 1, 2, 3단계에서의 공기온도가 각각 150~175℃, 100~150℃, 75~125℃이고 곡물의 이송속도가 5~7 m/hr일 때 만족된다. 템퍼링 대역으로 들어가는 벼의 낱알 온도

와 함수율이 일정하기 때문에, 이 곡물 이송속도에서 건조단계간 템퍼링 시간은 약 1 시간 정도면 충분하다. 표 12는 3단계 병류식건조기를 사용하여 함수율 23.5%인 벼를 13.5%로 건조시킨 실험결과이다. 2회 통과가 필요하였는데, 첫번째 통과시에는 수분의 5.4%가 제거되고 두번째 통과에서는 4.6%가 제거되었다. 각 단계에서 건조공기의 온도는 두번째 통과 시보다 첫번째 통과시에 높는데, 이것은 두번째 통과 시보다 첫번째 통과하는 동안 벼로부터 증발되어야 하는 수분이 더 많기 때문이다. 매우 높은 온도의 건조공기를 사용함에도 불구하고, 완전미수율은 단지 1.3%가량 감소하였다.

Table 12. Dryer settings for a three-stage *concurrent-flow* dryer with *medium-grain* rice using a double-pass system.

DRYING PASS	FIRST	SECOND
Initial moisture content (% w.b.)	23.5	18.1
Grain velocity (m/hr)	4.0	4.7
<b>FIRST STAGE</b>		
Inlet air temperature (°C)	150.0	130.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	40.0	35.0
Outlet moisture content (% w.b.)	21.7	16.6
Maximum rice temperature (°C)	54.0	59.0
Outlet rice temperature (°C)	38.0	44.0
<b>SECOND STAGE</b>		
Inlet air temperature (°C)	130.0	110.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	35.0	35.0
Outlet moisture content (% w.b.)	19.6	15.2
Maximum rice temperature (°C)	60.0	59.0
Outlet rice temperature (°C)	41.0	43.0
<b>THIRD STAGE</b>		
Inlet air temperature (°C)	100.0	100.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	35.0	35.0
Outlet moisture content (% w.b.)	18.1	14.0
Maximum rice temperature (°C)	55.0	56.0
Outlet rice temperature (°C)	39.0	42.0
<b>COOLING STAGE</b>		
Inlet air temperature (°C)	—	20.0
Airflow rate (m <sup>3</sup> /min - m <sup>2</sup> )	—	20.0
Final moisture content (% w.b.)	18.1	13.5
Dryer energy efficiency (kJ/kg)	4,453	4,158

Source : Brooker et al. (1992).

일반적으로 3단계 병류식 건조기에서 벼를 건조시키기 위하여 통과해야 하는 횟수는 벼의 품질이 동등한 수준으로 건조한다고 가정할 때 횡류식이나 혼합식 건조기에서의 통과 횟수의 1/3정도이다.

## V. 저장운영

벼의 적절한 저장운영의 목적은 저장기간 내내 벼가 수확 및 건조 직후에 갖고 있던 특성을 그대로 유지하는 것이다. 저장 동안에 벼의 질적 또는 양적 손실의 주요인은 곰팡이, 곤충, 쥐 등을 들 수 있다. 호흡도 어느 정도 손실에 영향을 주지만, 이러한 유기 생물체에 의한 손실에 비하면 호흡에 의한 손실은 미미한 편이다.

미국에서 벼는 콘크리트 사일로나 금속제 빈에 저장된다. 콘크리트 사일로는 비싸기는 하지만, 금속제 빈에 비하여 사일로 벽 근처의 벼가 주변 온도변화에 따른 영향을 훨씬 적게 받는다는 장점이 있다. 그러나, 적절하게 통풍만 해 준다면, 금속제 빈에서도 벼 온도의 불균일을 최소화시킬 수 있다.

미국 농가에서 벼는 직경 5.54m 내지 11.0m의 둥글고 밑이 평평한 주름진 강철 빈에 저장한다. 곡물의 퇴적 깊이는 약 5.5m이며 이들 빈의 저장 능력은 75 톤 내지 300 톤 사이이다. 빈은 경사진 스크류 콘베이어, 벨트 콘베이어, 버킷 콘베이어에 의하여 채워지며, 건조 및 통풍을 위하여 작은 구멍이 뚫린 마루판과 송풍관이 장착되어 있다. 또한 곡물 투입구 근처에만 곡물이 쌓이는 것을 방지하기 위하여 곡물 균분기 (grain spreader)를 사용하는 경우도 있다. 벼가 빈에 투입되기 전에 빈은 깨끗하게 청소되어 진다. 빈으로부터 곡물을 빼 낼 때는 sweep 오거나 underfloor 오거를 사용한다.

미국에서 벼는 수주 또는 수년 간의 기간동안 보관된다. 저장기간에 관계없이 곡물 페스트는 저장된 벼에 침투될 수 있다. 페스트 활동의 정도는 주로 (1) 벼의 수분함량, (2) 벼의 온도, (3) 곡물내의 이물질의 양, 그리고 (4) 벼품종에 의하여 영향을 받는다.

벼의 수분함량과 온도는 적절한 건조 및 통풍 기술을 수행함으로써 조절할 수 있으며, 이물질도 적절한 곡물 정선작업(cleaning)으로 제거할 수 있다. 그러나, 대개 기술자는 벼의 품종 선택에 대하여는 무관심하다.

### 1. 상온통풍

통풍의 주 목적은 저장된 벼를 수분함량 12~14%로 유지시키고 주변의 공기온도와 3~6°C 이상은 차이가 나지 않도록 하는 것이다. 통풍과정은 0.01~0.10 m<sup>3</sup>/min-tonne의 유속으로 주변의 공기를 곡물더미에 불어넣는 것이다. 이 때, 통풍제어기 (aeration controller)가 통풍여부, 시기 그리고 얼마나 오랫동안 통풍이 필요한 지를 결정한다.

미국에서 사용중인 가장 정교하고 프로그램이 가능한 통풍 제어기는 외기의 온도와 상대습도를 측정하며 또한 벼의 온도와 평형상대습도를 측정한다. 두 곳에서 측정이

이루어 지는데, 그 곳은 (1) 송풍팬 입구와 (2) 벼가 가장 열을 많이 받아 변질이 일어나기 쉬운 곳, 즉, 빈 중앙의 곡물 깊이 30 cm 되는 곳으로 공기의 흐름이 최소가 되는 지점이다. 제어기는 벼의 온도와 수분함량이 유지될 수 있도록 프로그램될 수 있다. 이러한 정보로 제어기의 마이크로프로세서는 곡물더미 내부에서 유지될 평형상대습도의 목표치를 계산한다.

조금 덜 정교한 제어기는 단순하게 공기와 벼의 온도에 근거하여 작동한다. 이 제어기는 입력변수로서 상대습도를 요구하는 통풍제어기에 비하여 센서의 변형(drift)에 의한 영향을 별로 받지 않는다는 것이 장점이다.

통풍용 팬의 작동은 제어기의 마이크로프로세서의 소프트웨어에 프로그램된 제어 전략에 의하여 제어된다. 상업용으로 사용되고 있는 통풍제어기에는 복잡한 정도에 따라 수 단계가 있다. 다음은 두 단계의 통풍제어기의 예이다.

#### 가. 팬의 작동

- (1) 주변공기의 상대습도가 65% 이하일 경우
- (2) 공기온도가 벼 온도에 비하여 8℃ 아래일 경우
- (3) 전력소비율이 최소일 경우

#### 나. 어떤 규정에 따른 팬의 작동

(1) 벼의 최대온도가 미리 선택된 온도보다 적어도 8℃ 높고 (예를 들면 7℃), 주위의 상대습도가 90% 이하이며, 주위 온도가 벼의 평균온도 보다 적어도 3℃ 낮으면 팬은 계속 작동된다.

(2) 측정된 벼의 평균온도와 미리 선택된 벼의 온도 그리고 측정된 벼의 평형함수율과 건조할 벼의 함수율 목표치의 차이에 의해 일상적인 팬의 작동이 제한된다.

(3) 만일 기상조건이 장기간 팬의 작동조건에 부합하지 않게 되면, 팬이 작동할 수 있는 온도-습도 범위가 자동적으로 확대 된다.

미국의 많은 통풍 시스템은 아직도 거의 수동으로 조작되고 있으며, 기껏해야 습도 조절기를 이용하는 정도이다. 위에서 언급된 자동조절기들은 수동 또는 습도조절기보다 고품위와 곤충의 제거에 있어서 대폭적으로 개선되었고, 과잉전조가 줄어들었으며 팬의 작동을 줄임으로써 전력소모가 10~20% 절약되었다.

## 2. 냉온통풍

외기를 이용한 통풍은 빈이나 사일로 내의 벼를 어느 정도 최소 외기온도까지 냉각시킬 수 있다. 몇몇 미국의 수도작 지역에서는 외기를 이용한 통풍으로는 저장된 벼를 즉시 10~15℃까지 냉각시킬 수 없다. 그러나 냉기를 이용한 통풍은 이것을 가능하게 한다. 그래서 몇몇 곡물처리시설에서는 냉온통풍이 현재 이용되고 있다.

냉온통풍이란 많은 곡물을 외기의 온도보다 낮게 냉각하는 것을 말한다. 곡물냉각기는 냉온통풍 과정에 이용되는데, 그 구조는 냉각코일이 설치된 관으로 외기를 불어 넣어 온도를 낮춘 다음 다시 전열기를 통과시켜 냉각된 공기를 데운다. 이렇게 하는 이유는 상대습도를 100%에서 60~70%로 낮추기 위해서이다. 그래서, 곡물냉각기 내의 공기온도와 상대습도는 운전자에 의해 설정된다. 일단 벼의 온도가 10~15℃까



지 냉각된 후 짧은 시간동안 간헐적으로 재냉각시켜 주어야 벼의 최적저장상태를 유지할 수 있다.

그림 11은 175 톤의 도정된 벼를 콘크리트 사일로에서 48시간 동안 21~29℃에서 11~12℃까지 냉각시키는데 냉온통풍을 사용한 예이다 (Maier, 1994). 유량은 0.6 m<sup>3</sup>/min 이었다. 이 곡물냉각기는 설정치의 ±0.5℃, ±2.0%까지 제어할 수 있다.

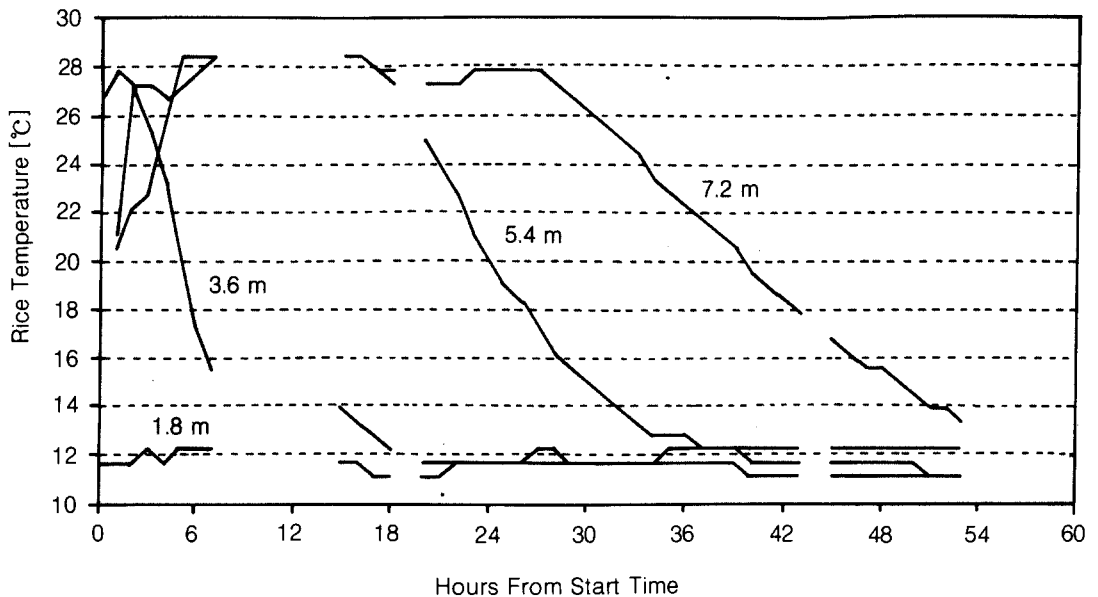


Fig. 11. Temperatures of milled rice conditioned with the Chilled Air Aeration and Conditioning System (AAG Manufacturing, Milwaukee, Wisconsin, U. S. A.) operating at a commercial rice processing facility in California in 1993.

## VI. 기타 요인

물리적, 생물학적, 경제적, 인간 공학적 요인들이 벼 건조/저장 체계에 영향을 미친다. 각각의 요인들은 생산량, 에너지 효율, 곡물의 질에 현저한 영향을 줄 수 있으므로 미국내에서는 공학적인 평가가 고려되고 있다.

기후는 특정 지역에서, 그리고 기대되는 함수율 범위, 수확시기의 날씨 등에서 성장할 수 있는 혼합 형식을 결정한다. 곡물의 초기 함수율과 온도는 건조기 성능에 현저한 영향을 미친다. 곡물의 초기 함수율과 온도는 생산량, 에너지 소비, 미질에 영향을 미칠 뿐만 아니라 운용 비용에도 영향을 미친다. 벼가 최적수확함수율보다 높거나 낮을 때 수확되면, 건조가 이루어질 때 벼의 품질이 나빠진다. 그러므로, 수확함수율이 최적의 값을 자주 초과하는 지역에서는 미질이 나빠지게 된다.

몇년동안 습도가 높은 날씨때문에 벼가 높은 함수율 상태로 건조기에 도달함으로

해서 건조기 용량이 낮아지고, 에너지 소비가 많아지며, 벼의 질이 떨어지는 결과를 가져온다. 기후 조건은 저온상온통풍건조빈의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 낮은 용량의 체계는 습도가 높은 미곡을 상품화된 단계로 건조시킬 수 없을 것이다. 고온의 지속적인 송풍체계가 습한 날씨에 의한 영향을 덜 받는 것이다. 경제적인 측면에서는 건조기 운용 비용은 연료비와 이용성에 영향을 받는다. 천연가스, 유류, 액화 프로판, 석탄 그리고 전기의 상대적인 가격은 매년 달라지고 있다. 현재 미국에서는 천연가스가 가장 싸고, 전기가 가장 비싼 에너지원이다. 연료의 종류는 버너의 효율과 건조공기의 질에 영향을 미치므로 연료의 선택은 건조기의 운용에 중요하다. 벼 건조는 열에 민감한 생물 생산물의 복잡한 열/질량/운동량의 전이과정이고, 일반 건조기 운전자는 충분히 이해하기가 쉽지 않다. 미국의 상업적인 처리 시설에서는, 건조 운전자의 직업은 한시적이다. 2~3개월 정도만 일주일에 7일 12시간 근무만 필요하다. 그 작업을 위한 직업 훈련은 또한 시행 착오적인 경우가 많다. 그래서, 건조 운용과정이 최적인 상태로 되는 경우는 매우 드물다. 적절한 운용은 용량, 에너지 효율과 미질 측면에서 전형적인 건조기의 성능을 발휘할 수 있도록 한다. 가장 빈번하게 일어나는 실수는 건조기의 용량을 증가시키기 위하여 높은 온도의 공기를 사용하는 것이다.

습도계는 미곡의 건조/저장 체계에서 총합적인 부분이다. 전기를 사용한 계측기가 미국의 처리시설에서 사용되고 있다. 계측기는 13~20% 습도 상태에서  $\pm 1\%$  정도의 오차를 갖고 있으나 그 보다 더 높은 습도에서는  $\pm 2.5\%$  정도의 오차를 가진다. 이것은 실질적으로 미곡의 과잉건조나 충분치 못한 건조를 야기시킨다.

벼 건조기내의 공기 온도 측정은 하나의 열전대(thermocouple)나 써미스터(thermistor)에 의해 이루어지는데, 건조기내에 온도 분포가 일정할 때만 의미가 있다. 그러나, 농장 밖에 있는 건조기와 농장안에 있는 건조기의 많은 경우에 있어서 온도 차이가 20~35℃ 정도되는 것은 보통이다. 그 결과로 인해 총방향의 곡물이 과잉건조되거나 평균적인 벼의 품질 저하를 가져올 수 있다. 그래서, 여러곳에서의 온도 측정이 미곡건조장치설비에 실용화되고 있다.

미곡 건조전에 정선은 미국내에서는 아직 일반화되어 있지 않다. 정선된 미곡은 건조기내와 저장 빈내의 송풍량이 보다 균일하게 되고 그러므로 해서 미곡이 균일한 함수율을 가지게 된다. 또한 정선은 정압을 낮게 만들고 통풍중의 건조기내의 송풍량이 증가하게 된다. 결국 건조기내에 들어가기 전에 정선된 미곡은 공기오염을 줄이고, 미국내에서의 기술을 적용하는데 있어서 좀더 신중히 고려되어야 한다.